

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



EFFECTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE CALCIO-SILICIO EN LA CALIDAD
DE LAS FLORES DE *LILIUM* Y SUS CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS BAJO
ESTRÉS SALINO

Tesis


Que presenta MARISOL GÓMEZ SANTOS

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

EFFECTO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE CALCIO-SILICIO EN LA CALIDAD
DE LAS FLORES DE *LILIUM* Y SUS CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS BAJO
ESTRÉS SALINO.

Tesis

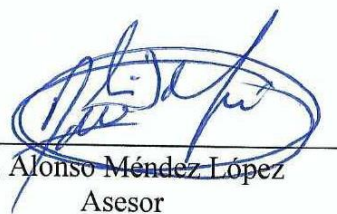
Elaborada por MARISOL GÓMEZ SANTOS como requisito parcial para obtener el
grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación del
Comité de Asesoría



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Director de tesis



Dr. Alonso Méndez López
Asesor



Dra. Marissa Pérez Alvarez
Asesor



Dr. Gregorio Cadenas Pliego
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Diciembre, 2023

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por acogerme en sus instalaciones durante mi estancia.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por el apoyo económico.

A la Maestría en Ciencias en Horticultura y sus profesores que compartieron su conocimiento, apoyo, perseverancia y colaboraron en mi formación académica.

Al Dr. Antonio Juárez Maldonado, por aceptarme en formar parte de sus tesis, por confiar en mí, dirigirme con paciencia y entusiasmo para culminar el proyecto de tesis.

Al comité de asesoría, Dr. Alonso López Méndez, Dr. Alberto Sandoval Rangel, Dra. Marissa Pérez Álvarez, Dr. Gregorio Cadenas Pliego, por su apoyo y aportaciones en la realización del trabajo.

DEDICATORIA

A mi familia.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Genero <i>Lilium</i>	4
Salinidad.....	4
Importancia del calcio y el silicio en las plantas.....	6
La nanotecnología.....	8
Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.....	8
Aplicaciones de nanopartículas de calcio y de silicio en la agricultura.....	12
MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
Síntesis de nanopartículas de calcio-silicio (NP Ca-Si).....	14
Desarrollo de plantas de <i>Lilium</i> en invernadero.....	14
Caracterización de nanopartículas de Ca-Si.....	15
Aplicación de tratamientos.....	15
Parámetros de calidad de las flores de <i>Lilium</i>	16
Variables bioquímicas.....	16
Análisis estadístico.....	18
RESULTADOS	19
DISCUSIÓN.....	30
CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Difractogramas de rayos X (DRX) (A) y termogramas (TGA) (B) de nanopartículas de CaSi-1 y CaSi-2.....	15
Figura 2. Calidad de flores de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	20
Figura 3. Contenido de clorofilas y relación de clorofilas a/b en hojas de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	21
Figura 4. Contenido de clorofilas y relación de clorofilas a/b en flores de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	22
Figura 5. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en hojas de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	24
Figura 6. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en flores de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	26
Figura 7. Contenido de peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) y malondialdehído (MDA) en hojas y flores de <i>Lilium</i> tratadas con nanopartículas de Ca-Si.....	27
Figura 8. Análisis de conglomerado jerárquico y Biplot de los tratamientos y variables de respuesta de <i>Lilium</i> tratado con nanopartículas de Ca-Si.....	29

RESUMEN Y ABSTRACT

Efecto de las nanopartículas de calcio-silicio en la calidad de las flores de *Lilium* y sus características bioquímicas bajo estrés salino

Que presenta MARISOL GÓMEZ SANTOS

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN
HORTICULTURA

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

DR. ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

Las plantas de *Lilium* es uno de los cultivos ornamentales más importantes y distribuidos en el mundo. Sin embargo, estas plantas también son susceptibles a la salinidad, un factor ambiental que es uno de los principales a nivel mundial. La salinidad afecta negativamente el desarrollo y productividad de las plantas, además de que puede afectar la calidad de las flores en cultivos ornamentales. El uso de la nanotecnología puede ser una herramienta útil para contrarrestar los efectos negativos de la salinidad, ya que la aplicación de nanopartículas puede funcionar como bioestimulante e inducir respuestas positivas contra diferentes tipos de estrés abiótico. En el presente estudio se evaluó la aplicación foliar de dos tipos y concentraciones de nanopartículas de calcio-silicio (NP Ca-Si) (500 y 750 mg L⁻¹) en plantas de *Lilium* cultivadas sin y bajo estrés salino (30 mM de NaCl). Las diferencias entre ambas nanopartículas fueron el tamaño y contenido de residuos inorgánicos, donde CaSi-1 tuvo un tamaño de 23.29 nm y un contenido de residuos inorgánicos del 62.0%, mientras que CaSi-2 tuvo un tamaño de 15.29 nm y un contenido de residuos inorgánicos del 87,0%. Los resultados mostraron que la salinidad afectó la calidad de las flores, así como los parámetros bioquímicos de las plantas. Por el contrario, la aplicación de NP Ca-Si indujo efectos positivos sobre la calidad de las flores, mejoró el tamaño de las flores y la biomasa fresca. En condiciones de estrés salino, la aplicación de NP Ca-Si en *Lilium* mejoró los parámetros bioquímicos, aumentó el contenido de clorofilas (hasta 38,1%), vitamina C (9,4%) y la capacidad antioxidante (19,2-23,8%) en las hojas. En cuanto a los indicadores de estrés en las hojas, el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) no fue afectado por la salinidad ni por las NP Ca-Si, mientras que el malondialdehído (MDA) aumentó por la aplicación de las NP, sin embargo, bajo estrés salino no hubo diferencias. En las flores de *Lilium* sin estrés salino, tanto el H₂O₂ como el

MDA aumentaron con la aplicación de NP Ca-Si, mientras que bajo estrés salino solo aumentó el MDA. El uso de NPs Ca-Si puede ser una alternativa para contrarrestar los efectos nocivos del estrés salino en las plantas.

Palabras clave: estrés abiótico, compuestos antioxidantes, sistema de defensa antioxidante, nanomateriales, biomarcadores de estrés.

ABSTRACT

Lilium plants are one of the most important and widely distributed ornamental crops in the world. However, these plants are also susceptible to salinity, an environmental factor that is one of the main ones worldwide. Salinity negatively affects the development and productivity of plants, in addition to the fact that it can affect the quality of flowers in ornamental crops. The use of nanotechnology can be a useful tool to counteract the negative effects of salinity, since the application of nanoparticles can function as a biostimulant and induce positive responses against different types of abiotic stress. In the present study, the foliar application of two types and concentrations of calcium-silicon nanoparticles (Ca-Si NPs) (500 and 750 mg L⁻¹) in *Lilium* plants grown with or without stress and under saline stress (30 mM NaCl) was evaluated. The difference between the two nanoparticles was the size and the inorganic residues content, where CaSi-1 had a size of 23.29 nm and a content of inorganic residues of 62.0 %, while CaSi-2 had a size of 15.29 nm and a content of inorganic residues of 87.0 %. The results showed that salinity affected the quality of the flowers, as well as the biochemical parameters of the plants. In contrast, the application of Ca-Si NPs induced positive effects on flower quality, improved flower size and fresh biomass. Under salt stress conditions, the application of Ca-Si NPs in *Lilium* improved the biochemical parameters, increased the content of chlorophylls (up to 38.1 %), vitamin C (9.4 %), and antioxidant capacity (19.2-23.8 %) in the leaves. Regarding the stress indicators in the leaves, the hydrogen peroxide (H₂O₂) was not affected by salinity or by the Ca-Si NPs, while the malondialdehyde (MDA) increased by the application of the NPs, since under saline stress there were no differences. In *Lilium* flowers without salt stress, both H₂O₂ and MDA increased by the application of Ca-Si NPs, while under salt stress only MDA increased. The use of Ca-Si NPs can be an alternative to counteract the harmful effects of salinity stress in plants.

Keywords: biotic stress, antioxidant compounds, antioxidant defense system, nanomaterials, stress biomarkers.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de plantas ornamentales a nivel mundial es de gran importancia económica, no sólo por su uso propio como flores ornamentales, sino que también, en muchos casos, las plantas ornamentales se utilizan como alimento o como planta medicinal (Takahashi *et al.*, 2020). En cualquier caso, el cultivo de plantas ornamentales es una actividad importante para la humanidad. Uno de los géneros de especies ornamentales más importantes y ampliamente distribuidos en el mundo es *Lilium* de la familia Liliaceae, que comprende alrededor de 100 especies (entre las que se encuentra el *Lilium* oriental, híbrido de *Lilium auratum* y *Lilium speciosum*) distribuidas en el hemisferio norte, en climas fríos y climas templados (Kim *et al.*, 2019). Este género también es importante porque puede utilizarse como alimento, además de tener propiedades que favorecen la salud por su alto contenido en compuestos fenólicos y gran actividad antioxidante (Liang *et al.*, 2022). Además, las plantas de *Lilium* contienen compuestos que pueden ser utilizados en la industria cosmética como ácidos fenólicos, flavonoides y polisacáridos, los cuales pueden ser empleados como protectores solares, limpiadores faciales, mascarillas faciales, acondicionadores y otros (Tang *et al.*, 2022). En México, durante el año 2022 se produjeron 5,368 millones de flores ornamentales, entre las que destacan el crisantemo, rosa, gladiola, gerbera, *Lilium* y girasol (SIAP, 2023).

La salinidad del suelo es uno de los mayores problemas para los sistemas de producción agrícola, este problema afecta a más de mil millones de hectáreas distribuidas en 100 países (Singh, 2022). La salinidad, por tanto, es uno de los principales factores de estrés abiótico para las plantas, ya que induce una serie de efectos negativos que finalmente afectan gravemente a la productividad. La salinidad induce estrés osmótico, toxicidad iónica, desequilibrio hormonal en las plantas, puede afectar la capacidad fotosintética de las plantas e inducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) que pueden generar estrés oxidativo (Li *et al.*, 2022; Shams & Khadivi, 2023).

El efecto adverso que ejerce la salinidad sobre la disminución de la biomasa, tamaño, desarrollo y calidad de hojas, brotes y flores ha sido reportado en diferentes especies ornamentales con concentraciones relativamente bajas de salinidad, por ejemplo en plantas de *Euphorbia* (-5 dS m^{-1}) (Bañón *et al.*, 2022), *Iris germanica* (70 mM) (Zhao *et*

al., 2021), *Zinnia* (50 mM) (Yasemin & Koksall, 2023) y *Lilium* (25 mM) (Bai *et al.*, 2021). La mayoría de los cultivares de *Lilium* (híbridos asiáticos, híbridos orientales e híbridos interespecíficos) suelen ser susceptibles al estrés salino (Kang *et al.*, 2021). Bai *et al.* (2021), informaron que en híbridos de *Lilium asiatica* × *Lilium asiatica* y *Lilium asiatica* × *Lilium longiflorum*, las concentraciones de 35 mM de NaCl disminuyeron significativamente el peso fresco y seco de los brotes, el contenido de clorofila, la tasa fotosintética, la conductancia estomática y la actividad de superóxido dismutasa y peroxidasas de las hojas. Kang *et al.* (2021), evaluaron 26 variedades de *Lilium* híbrido asiático y oriental expuestas a 8 dS m⁻¹ de NaCl y reportaron que esta concentración generó un alto estrés salino, provocando una disminución en el número y diámetro de las flores y alterando las características de crecimiento de los cultivares. Además, con una conductividad eléctrica de 4 dS m⁻¹ en la solución del suelo, la mayoría de los cultivares de *Lilium* sufrieron daños por la salinidad. Estos datos demuestran claramente el efecto adverso de la salinidad en las plantas de *Lilium*.

Para hacer frente a los problemas de salinidad y sus efectos adversos en los cultivos se han implementado diferentes herramientas y estrategias con resultados positivos. La aplicación foliar de las moléculas señalizadoras de óxido nítrico (NO) ha sido probada en el cultivo de lechuga, observándose un aumento de compuestos antioxidantes, lo que ayudó a mitigar el estrés salino en las plantas (Sardar *et al.*, 2023). La aplicación de selenito de sodio (Na₂SeO₃) mejoró las características agronómicas de las plantas de mijo poroso bajo estrés de 150 mM de NaCl, además, aumentó la actividad de diferentes enzimas antioxidantes y los niveles de osmolitos, al mismo tiempo que disminuyó el contenido de H₂O₂ (Rasool *et al.*, 2022). Una de las tecnologías que se están aplicando para contrarrestar los efectos negativos de la salinidad en las plantas es la nanotecnología, que permite manipular materiales con al menos una dimensión menor a 100 nm. En particular, la aplicación de diversos nanomateriales en plantas se ha utilizado para mitigar el estrés salino en plantas con resultados positivos en varias especies de plantas.

La aplicación al suelo de NP de fosfato de calcio (NP CaP) ha demostrado ser útil para mitigar los efectos negativos de la salinidad en plantas de haba (*V. faba*), mejoró el rendimiento de las plantas, los azúcares solubles totales, las enzimas antioxidantes, el

contenido de prolina y los fenoles totales, mientras que disminuyó los indicadores de estrés oxidativo (MDA y H_2O_2) (Nasrallah *et al.*, 2022). Por otro lado, la aplicación foliar de nanopartículas de silicio en plantas de tomate injertadas fue eficiente para reducir los efectos negativos de la salinidad, ya que se logró un aumento significativo en el crecimiento de las plantas, el rendimiento de los frutos, la calidad de los frutos, especialmente el contenido de vitamina C y el porcentaje de SST, los contenidos de minerales, los niveles de GA_3 , ABA y prolina (Sayed *et al.*, 2022). También se observó que la aplicación de nanopartículas de silicio en plantas de guisante (*Pisum sativum* L.) bajo estrés salino mejoró el crecimiento vegetativo y el contenido relativo de agua (CRA), y provocó un aumento significativo en la altura de la planta, peso fresco y seco, rendimiento total y el sistemas de defensa antioxidante, también mejoró el contenido de K^+ en raíces y brotes, así como disminuyó el contenido de Na^+ (Ismail *et al.*, 2022).

Aunque se ha demostrado que el uso de diferentes nanopartículas puede ser una excelente herramienta para mitigar los efectos negativos del estrés salino en las plantas, no se ha estudiado el efecto conjunto de estas nanopartículas. Particularmente en el cultivo de *Lilium*, se ha estudiado el efecto de las nanopartículas de plata (Salachna *et al.*, 2019), óxido de zinc (Pałka *et al.*, 2023) y silicio (Sanchez-Navarro *et al.*, 2021), pero los nanocompuestos formados por las nanopartículas de calcio y silicio no han sido estudiadas. Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de dos tipos y concentraciones de nanopartículas de calcio-silicio en plantas de *Lilium* desarrolladas en condiciones de salinidad, y determinar los cambios bioquímicos y agronómicos asociados con las condiciones de estrés y la aplicación de nanopartículas.

Objetivos específicos:

Determinar el efecto de las diferentes dosis de NP de Ca-Si y el estrés salino sobre el desarrollo y crecimiento de las plantas de *Lilium*.

Evaluar el efecto en la calidad de la flor de *Lilium*.

Determinar la acumulación de compuestos bioactivos en las plantas de *Lilium*.

Determinar la respuesta fisiológica y del sistema de defensa antioxidante en las plantas de *Lilium*.

REVISIÓN DE LITERATURA

Género *Lilium*

El género *Lilium* (*Liliaceae*) comprende plantas monocotiledóneas, bulbosas, perennes, con aproximadamente 100 especies, de las cuales más de la mitad tienen su centro de origen en China y están distribuidas en las regiones frías del hemisferio norte, donde generalmente se cultivan para la industria ornamental (Zhou *et al.*, 2021; Du *et al.*, 2014). Este género consta de 7 secciones, entre ellos se encuentra el lirio oriental, perteneciente a la categoría *Archelirion* que representa los híbridos más valiosos debido a las características morfológicas de sus flores (Youssef *et al.*, 2019).

En la floricultura, *Lilium* se maneja como flores de corte, cultivo en macetas, o flores de jardín, y representa una alta demanda en la industria ornamental, por su llamativo color, tamaño y fragancia. Además, sus bulbos se emplean como una fuente de nutrientes y en general, presenta relevancia cosmética y medicinal debido, a su actividad antioxidante y presencia de componentes activos (fenoles, flavonoides, nicotinamida) (Tang *et al.*, 2021; Pelkonen & Pirttilä, 2012).

Se sabe que la reproducción de las plantas está estrechamente relacionada con una adecuada importación de fotoasimilados (sacarosa y almidón), que son la fuente de energía para el funcionamiento, desarrollo, y para la formación de los aparatos fotosintéticos y no fotosintéticos de las plantas (Ren *et al.*, 2023; Ruan, 2014).

Salinidad

Se conoce que la calidad de las flores de *Lilium* se ve afectada por las condiciones de crecimiento, ya que son plantas susceptibles al estrés biótico y abiótico, además, se sabe que hoy en día la calidad y la productividad de las plantas se ve amenazada por varios factores, de los cuales destacan la salinidad, el cual es un problema que afecta a gran escala a la producción de los cultivos a nivel mundial (Kim & Oh, 2021; Guo *et al.*, 2020; Yin *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2023). Se estima que, a nivel global, el deterioro por salinidad es del 10 %, para nuestro país, de la superficie agrícola destinada a la producción bajo un sistema de riego (897 millones de ha), el 10 % se ve afectada por la salinidad, y de la superficie total afectada, el 64 % se encuentra en el norte del país, por lo que se buscan

alternativas para mitigar los efectos del estrés (Khan *et al.*, 2023; Zaman *et al.*, 2018; INIFAP, 2012).

Se sabe que la salinidad provoca en las plantas, un desequilibrio hormonal, el estrés osmótico, estrés iónico y el estrés oxidativo, por la excesiva generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que afectan a los distintos procesos metabólicos (síntesis de proteínas y lípidos, fotosíntesis, ADN) y la actividad enzimática de las plantas y en consecuencia perturba su desarrollo y su rendimiento (Rasool *et al.*, 2013; Ondrasek *et al.*, 2022; Parihar *et al.*, 2014).

Distintos iones pueden causar el estrés salino y el cloruro de sodio (NaCl) es el más estudiado debido a su facilidad de disociación, por lo que es el principal causante de las alteraciones osmóticas en la planta, además el Na^+ afecta a la estructura del suelo (Safdar *et al.*, 2019). La presencia de la sal afecta la absorción de agua y nutrientes en la planta y su absorción excesiva durante el proceso de transpiración llega a dañar las células de las hojas y por ende a los pigmentos fotosintéticos lo que conduce a un menor crecimiento y desarrollo de las plantas, se sabe que un alto contenido de cloro causa clorosis en las hojas y afecta el contenido de clorofila, por otro lado el ion Na^+ inhibe la actividad enzimática y compite con el K^+ , debido a que presentan transportadores similares y la presencia del potasio es importante ya que regula alrededor de 50 enzimas involucradas en el metabolismo de las plantas (Parihar *et al.*, 2014; Safdar *et al.*, 2019).

Las plantas, en primera instancia requieren de la producción de osmoprotectores (azúcares, aminoácidos) y tienen diferentes tipos de antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD), glutatión, vitamina C, fenoles, flavonoides) para proteger y controlar los efectos adversos causados por el estrés salino (Rasool *et al.*, 2013; Isayenkov, 2012).

En la agricultura, la nanotecnología basada en nanomateriales o nanopartículas promueve mitigar los efectos adversos del estrés biótico así como abiótico, ya se han utilizado distintas nanopartículas de ZnO , CuO , SiO_2 , CeO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 por mencionar algunas para contrarrestar los efectos negativos causados por la salinidad e incrementar la eficiencia de las plantas (Ondrasek *et al.*, 2022; Prasad *et al.*, 2017). Pérez-Labrada *et al.* (2019), informaron que la aplicación foliar de nanopartículas de cobre (NP de Cu) en

plantas de tomate bajo condiciones de salinidad, incremento en el fruto el contenido de fenoles en un 7.8 %, la vitamina C en un 80 % y el glutatión en un 81 %, además en las hojas se incrementó el contenido de fenoles (16 %) y otros compuestos antioxidantes enzimáticos. En un estudio realizado en soya (*Glycine max* L.) bajo condiciones de estrés salino, se observó que la aplicación de nanopartículas de silicio disminuyó el contenido de Na^+ y aumento el K^+ , además promovió la actividad antioxidante de compuestos enzimáticos y no enzimáticos regulando la sobreproducción de las ROS (Farhangi-Abriz & Torabian, 2018). También se ha documentado que la aplicación de nanopartículas de dióxido de titanio (NP de TiO_2) en plantas de bálsamo de maldavia (*Dracocephalum moldavica* L.) bajo condiciones de salinidad (50, 100 mM de NaCl) aumentó el contenido de clorofila a, clorofila b y carotenoides, además de promover la producción de metabolitos secundarios y disminuir el contenido del peróxido de hidrogeno (H_2O_2), debido a la actividad enzimática de ascorbato-peroxidasa (APX) y catalasa (CAT) (Gohari *et al.*, 2020). Por otro lado, Salachna *et al.* (2019), evaluaron diferentes concentraciones (25, 50 ,100 y 150 ppm) de nanopartículas de plata (NP de Ag) en el cultivo de lirio oriental (*Lilium*) y observaron que la concentración de 100 ppm de NP de Ag mejoró el contenido de clorofila a (31.2 %), clorofila b (23.1 %) y carotenoides (26.3 %), lo que resulto en un mejor crecimiento de las flores. Además, la aplicación de las NP de Ag (100 ppm) bajo condiciones de salinidad (600 mM de NaCl) promovió una mayor altura de la planta (7.6 %), aumento el peso fresco, el número de escamas y el diámetro del bulbo, en un 42.3, 46.9 y 13.7 % respectivamente (Byczyńska *et al.*, 2023). Una de las ventajas de aplicar la nanotecnología en la agricultura es que permite elaborar productos con sustancias de liberación controlada y presentan mayor precisión hacia su objetivo.

Importancia del calcio y el silicio en las plantas

El calcio (Ca) es un elemento importante para el funcionamiento de las plantas, presenta función estructural y es un segundo mensajero. El Ca es esencial, debido a que, presenta diferentes funciones dentro de la planta: es parte de la estructura de la pared celular, forma pectatos (compuestos que unen las células, otorgan fuerza y rigidez), mantiene la estructura y previene el colapso de la célula vegetal. Regula la división celular (necesario para el crecimiento y el desarrollo) y la permeabilidad de las membranas celulares

(importante para controlar el movimiento de nutrientes, agua y otras sustancias dentro y fuera de las células) (Thor, 2019; Abeed *et al.*, 2023).

El Ca juega un papel en la activación enzimática (actúa como cofactor de varias enzimas implicadas en diversos procesos metabólicos, muchas enzimas requieren iones de calcio para funcionar correctamente) y en la señalización celular para coordinar las respuestas de las plantas a los cambios en su entorno (funciona como un segundo mensajero en varias vías de transducción de señales, ayuda a transmitir y amplificar señales de hormonas, señales ambientales y respuestas al estrés (Thor, 2019; Lecourieux *et al.*, 2006; Safdar *et al.*, 2019).

Además, es necesario mantener niveles adecuados de calcio en el suelo para que las raíces de las plantas absorban adecuadamente los nutrientes. El Ca ayuda a mantener la integridad de la membrana celular de la raíz (permite el transporte eficiente de nutrientes esenciales, como el potasio (K) y el magnesio (Mg), otorga tolerancia frente al estrés ambiental (como la sequía, la salinidad y la toxicidad por metales pesados, puede actuar como agente protector contra el daño celular inducido por el estrés), interviene en el desarrollo del fruto (previene la pudrición apical) y síntesis de celulosa. Es importante señalar, que es necesario mantener una cantidad adecuada de Ca en el suelo, para obtener un apropiado crecimiento de las plantas, debido a que un exceso de calcio puede provocar desequilibrios y mala absorción de otros nutrientes (Lecourieux *et al.*, 2006; Seifikalhor *et al.*, 2019; Hadi & Karimi, 2012).

El silicio (Si), es el segundo elemento más abundante después del oxígeno, presente en casi todos los minerales en forma no biodisponible para las plantas, desempeña varias funciones importantes en las plantas, su importancia puede variar según las condiciones ambientales en las que se encuentran las plantas y la respuesta a sus beneficios dependerá de cada especie de planta, puesto que no es un elemento crucial para todas las especies. El Si es absorbido por las plantas como hidróxido de silicio Si(OH)_4 y presenta las siguientes funciones: genera tolerancia al estrés abiótico como la sequía, la salinidad y la toxicidad de los metales (regula la absorción de agua, reduciendo la transpiración y facilitando la absorción de nutrientes), otorga resistencia a enfermedades, forma una barrera física en los tejidos vegetales, lo que dificulta que los patógenos fúngicos y

bacterianos penetren y colonicen la planta (Pavlovic *et al.*, 2021; Souri *et al.*, 2021; Tripathi *et al.*, 2016).

El Si confiere soporte estructural (el silicio se deposita y forma fitolitos de SiO_2 en las paredes de las células vegetales, fortaleciéndolas y estabilizándolas), tiene efecto sobre el metabolismo del N, mejora la absorción y transporte de nutrientes como el P, Mg y Ca, puede reducir la pérdida de agua (transpiración) de los tejidos vegetales formando una capa de sílice similar a una cutícula en la superficie de la hoja, también aumenta la tasa fotosintética al mejorar la eficiencia de los cloroplastos, lo que conduce a un mayor crecimiento y productividad (Zargar *et al.*, 2019; Abdelaal *et al.*, 2020).

La nanotecnología

La nanotecnología permite la manipulación, la producción y uso de materiales orgánicos e inorgánicos o una combinación de ambos con dimensiones a nanoescala que van desde 1 a 100 nanómetros con alta relación superficie-volumen, implica modificar, construir o reorganizar materiales y estructuras (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019). La nanotecnología, presenta tecnologías nuevas en expansión, ha revolucionado varias industrias, posee numerosas aplicaciones en diferentes aspectos de la vida cotidiana, desarrollando y mejorando métodos innovadores para formular y fabricar nuevos productos que puedan mitigar los daños provocados al medio ambiente (Malik *et al.*, 2023).

La transformación y manipulación de los materiales a nivel atómico y molecular conduce a propiedades y estructuras físicas, químicas y biológicas únicas especializadas (Mohammad *et al.*, 2022; Sakhare, 2022).

Aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura

Una de las tecnologías más aplicadas en los diferentes campos es la nanotecnología y presenta gran relevancia en la industria textil, alimentaria, medicina, construcción, entre otras, incluyendo la agricultura. La nanotecnología implementa la ingeniería genética para la transferencia de genes mejorados, mejora la protección de las plantas con recubrimientos que tienen como objetivo proteger a la planta contra el estrés biótico y abiótico, e incrementa la absorción de los nutrientes que implican el uso de portadores, además otorgan un mejor manejo de los cultivos empleando nanosensores que ayudan a

monitorear las condiciones ambientales, la calidad y los niveles de nutrientes del suelo (Davari *et al.*, 2017; Cicek & Nadaroglu, 2015).

Los nanomateriales y las nanopartículas en la agricultura, suelen considerarse como un tipo de bioestimulante (estimulan y modifican los procesos metabólicos, modulando el uso eficiente de los recursos o insumos utilizados para la producción agrícola), permitiendo reducir las prácticas que conllevan el uso excesivo de insumos agrícolas (pesticidas, herbicidas, fertilizantes, reguladores de crecimiento por mencionar algunos) que afectan al entorno, además proporciona herramientas con nuevos mecanismos de administración, entrega directa y controlada de los recursos e insumos, buscando reducir la cantidad aplicada e incrementar su eficiencia para mejorar la producción agrícola y afrontar los problemas ambientales (Juárez-Maldonado *et al.*, 2019; Kaningini *et al.*, 2022; Davari *et al.*, 2017). A continuación, se mencionan algunas aplicaciones de la nanotecnología en la agricultura.

Nanofertilizantes. Las plantas requieren de los distintos elementos minerales para su adecuado crecimiento, por lo que los agricultores han adoptado prácticas que incluyen la aplicación de fertilizantes (las cuales contienen aquellos nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas) pretendiendo incrementar la productividad y en consecuencia ha causado la contaminación del ecosistema, principalmente del agua y suelo a causa de una intensiva fertilización inconsciente, puesto que los cultivos adquieren menos de la mitad de los fertilizantes aplicados y el resto generalmente se pierde por degradación microbiana, evaporación, lixiviación o acumulación, esto provoca una alteración al suelo que afecta a la productividad y la calidad de los cultivos, a los organismos vivos y a la salud humana (Cicek & Nadaroglu, 2015; Kaningini *et al.*, 2022).

La aplicación de nuevas tecnologías como el uso de nanomateriales o nanopartículas tiene gran relevancia en la industria agrícola, ya que se han desarrollado nanofertilizantes con propiedades específicas para incrementar la eficacia y la productividad de los cultivos, con el objetivo de reducir la contaminación provocada por la excesiva aplicación y acumulación de los fertilizantes comunes (Cicek & Nadaroglu, 2015; Prasad *et al.*, 2017). Los nanofertilizantes poseen formulaciones de liberación controlada y actúan como un portador nutrimental, incrementando la absorción de los nutrientes que tienen efecto sobre

el crecimiento y el rendimiento de las plantas bajo estrés, además por su alta relación superficie-volumen, reduce la cantidad y las mermas de los fertilizantes aplicados. Los fertilizantes a nano escala presentan dos vías de entrada hacia la planta, la principal vía es por medio de las hojas (absorción por medio de las estomas, hidátodos (estoma no funcional) y la cutícula), la segunda vía es por medio de la rizodermis o por los pelos de las raíces (Verma *et al.*, 2022).

Nanoplaguicidas. Dentro de la agricultura convencional, generalmente se han utilizado sustancias nocivas con efecto plaguicida para el control y erradicación de los organismos que afectan al rendimiento de los cultivos, su uso a lo largo del tiempo ha afectado al medio ambiente y a la economía de los productores, por lo que se han desarrollado estrategias para mitigar los efectos adversos provocados por el uso excesivo de los pesticidas y a su vez aumentar su eficacia con productos menos nocivos, formulados con ingredientes activos (metabolitos secundarios) (Chaud *et al.*, 2021; Chhipa, 2017).

La nanotecnología permite procesar insumos agrícolas mediante la encapsulación, por medio de la manipulación de los materiales permitiendo así, reducir la contaminación del medio ambiente. La nanoencapsulación funciona como un portador de formulaciones de pesticidas y pretende incrementar la eficiencia de los mismos por medio de la liberación controlada del compuesto activo, la cual está cubierta por una capa protectora para evitar la liberación excesiva y la contaminación mediada por las sustancias tóxicas. Los pesticidas a nivel nanométrico presentan efectos letales en un tiempo mínimo, su composición y mayor relación superficie-masa le confiere al portador un contacto directo con el organismo atacante (plaga) (Chaud *et al.*, 2021; Cicek & Nadaroglu, 2015).

Nanoherbicidas. En los agroecosistemas, la presencia de las malezas tiene un impacto en el rendimiento de los cultivos, lo que afecta a los productores y al medio ambiente, ya que los productores recurren a la aplicación de herbicidas para eliminar a las malas hierbas, sin embargo, los herbicidas tradicionales suelen contaminar el medio ambiente y solo eliminan una parte de las malezas que abarca el follaje y la parte aérea, mas no presenta efecto más allá debajo del suelo, donde se encuentran los medios de propagación (rizomas, tubérculos) y dan resultado a la regeneración de las malas hierbas (Cicek & Nadaroglu, 2015; Zargar *et al.*, 2023 Nisha Raj *et al.*, 2021).

Los avances nanotecnológicos han desarrollado portadores con efecto herbicida, existen formulaciones de nanocompuestos activos herbicidas conteniendo nanopartículas, estos mejoran la adhesión y la penetración de los ingredientes activos en los tejidos de las malezas, su tamaño nanométrico y su potencial superficie específica le otorga gran afinidad a su objetivo, y por tanto tiene un mayor efecto de interacción, a su vez reduce la acumulación y la contaminación causada por la aplicación gradual de los herbicidas (Cicek & Nadaroglu, 2015; Zargar *et al.*, 2023). Los nanoherbicidas, presentan un nivel de precisión y controlan la liberación de los compuestos activos, lo que le permite atacar específicamente a su objetivo (Cordon *et al.*, 2022).

Nanosensores. Hoy en día se pretende desarrollar tecnologías para prevenir o combatir tanto el cambio climático, así como el incremento demográfico. Los nanosensores es una de las herramientas de la nanotecnología que presenta mayor precisión para detectar los problemas adversos que enfrenta la industria agrícola. Estos sensores de nivel nanométrico funcionan como un sistema inteligente de cuantificación, para el suministro y control adecuado de los insumos aplicados en la industria agrícola, además ayudan a detectar los factores del ambiente biótico, así como abiótico (organismos patógenos, insumos agrícolas, temperatura, etc.) que influyen para el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas, conduciendo a incrementar su rendimiento (Sharma *et al.*, 202; Cicek & Nadaroglu, 2015).

Los nanosensores tienen diferentes funciones específicas, como la detección de factores ambientales, la presencia de organismos patógenos y de contaminantes, entre otros. Se ha demostrado que los nanosensores electroquímicos, sirven como una herramienta de monitoreo y cuantificación del pesticida malatión. Un sensor a base de nanopartículas de CuO funcionalizadas con nanocompuesto de grafeno a 3D detectó el pesticida a un nivel de 0.01 nM y otro sensor a base de nanocompuesto de quitosano y óxido de hierro presentó alta sensibilidad (0.001 ng mL^{-1}) a la detección de malatión (Xie *et al.*, 2018; Prabhakar *et al.*, 2016).

Aplicaciones de nanopartículas de calcio y de silicio en la agricultura

Actualmente una de las tecnologías de vanguardia que promete mejorar al área agrícola, es la nanotecnología. Estudios han demostrado que con el uso de nanopartículas se pueden combatir enfermedades, controlar plagas, incrementar la producción y la calidad de los cultivos (Mustapha *et al.*, 2022; Khalid *et al.*, 2022;). Reportes sugieren que las NP generan una serie de respuestas y modifican las rutas metabólicas de las plantas, así como incrementar el contenido de clorofila, las enzimas antioxidantes, y pueden estabilizar y reducir los efectos negativos producidos por las especies reactivas de oxígeno (ROS) (Wohlmuth *et al.*, 2022; Wu & Li, 2022).

Existen distintas formulaciones de NP de silicio o de calcio para fomentar la producción y eludir los efectos de distintos tipos de estrés en cultivos comestibles y no comestibles. Por ejemplo, se ha documentado que al aplicar 150 mg L⁻¹ NP de silicio en plantas de limoncillo (*Cymbopogon flexuosus*), incrementó el crecimiento y el rendimiento (Mukarram *et al.*, 2021). En otro estudio, las NP de dióxido de silicio mejoraron la actividad fotosintética, así como el nivel de K⁺ y disminuyeron el Na⁺ en plantas de plátano (*Musa acuminata* 'Grand Nain') (Mahmoud *et al.*, 2020). Además, González-García *et al.* (2022), revelaron que las NP de Si, en plantas de pimiento bajo estrés salino, aumentaron el nivel de glutatión (compuesto antioxidante). Por otro lado, Ayyaz *et al.* (2022), mencionan que al aplicar NP de calcio en plantas de canola (*Brassica napus* L.), se redujo el estrés oxidativo causado por sequía. Gandhi *et al.* (2021), mencionan que al aplicar 150 mL de NP de dióxido de calcio (CaO) diluido en 100 mL de agua destilada en semillas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.), promovió 100 % la germinación de las semillas e incrementó la tasa de crecimiento y el contenido antioxidante de enzimas peroxidasas (10.11 mg g⁻¹). En un estudio realizado en plantas de haba (*Vicia faba* L.) bajo y sin condiciones de estrés salino, se demostró que la aplicación de nanopartículas de fosfato de calcio (NP CaP) bajo condiciones de salinidad, incrementó el contenido total de azúcares solubles de un 71 % en la etapa vegetativa, un 23 % en la etapa de floración y un 43 % en la etapa de formación de vainas, mientras que en condiciones sin estrés aumento el contenido de esta variable de un 90 % en la etapa vegetativa (Nasrallah *et al.*, 2022). La aplicación de NP de Ca en plantas de tomate (*Solanum lycopersicon* L.) sometidas a

estrés salino (50, 100 y 200 mM de NaCl) promovió el crecimiento y el sistema de defensa de las plantas de tomate, se observó que la aplicación de las NP Ca incrementó el peso fresco (169.90 %, 225.60 %) y el peso seco (146.90 %, 183.30 %) de brotes y raíz respectivamente, además, aumento la longitud del brote (47.37 %), el contenido relativo de agua (15.59 %), la vitamina C (56.32 %) y los compuestos fenólicos (98.05 %) bajo condiciones de estrés a 50 mM de NaCl (Abeed *et al.*, 2023). Sánchez-Navarro *et al.* (2021), señalaron que la aplicación foliar de 600 mg L⁻¹ de NP de Si, incrementó la longitud del botón floral y la vida útil de las flores de un 27.77 % y 21.62 % más que el control. En plantas de gerberas (*Gerbera Jamesonii*) la aplicación de 80 mg L⁻¹ de NP de silicio + 240 mg L⁻¹ de calcio quelatado, aumentó el contenido de lignina (33 %) y celulosa (15 %) respecto al control (Alikhani *et al.*, 2021). La aplicación de NP de Si a 300 mg L⁻¹, incrementó la absorción y el contenido de agua en *Duranta erecta* sometidas a condiciones de salinidad (Aly *et al.*, 2023). Se ha demostrado que la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (400 mg L⁻¹) incrementa un 60 % más la vida de florero de las plantas de *Polianthes tuberosa* L. (nardo) (Karimian *et al.*, 2021). Cokul Raj *et al.* (2023), mencionan que al implementar las NP de Si en condiciones in vitro, promueve la inducción de botones florales en una especie aromática (*Vitex negundo* L.). La aplicación de NP de carbonato de calcio y silicio incrementaron el número de inflorescencias, el crecimiento y la vida útil de florero de *Dahlia pinnata* (Kasem *et al.*, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis de nanopartículas de calcio-silicio (NP Ca-Si)

La síntesis de NP Ca-Si se llevó a cabo mediante un procedimiento similar al informado por Huang *et al.* (2017), una breve descripción es la siguiente: se mezclaron 3.3 g de bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) y 6 ml de $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en 300 mL de agua destilada y luego se agitaron durante 15 minutos a 65 °C. A continuación, se añadieron 15 ml de ortosilicato de tetraetilo y 15.6 g de nitrato de calcio $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ agitado a 400 revoluciones por minuto (rpm) durante 3 horas. Luego, el producto de reacción se filtró y el sólido se lavó con agua destilada con un pH de 7.0, finalmente se lavó nuevamente con etanol y se volvió a filtrar. Después de esto, el sólido obtenido se secó a 90 °C durante 36 horas y el producto final fue un sólido blanco (CaSi-1).

Para la obtención de CaSi-2, se sinterizó Ca-Si-1 a 550 °C durante 3 horas, para obtener un sólido de color arena (CaSi-2). La relación CaO/SiO_2 fue de 1.05 determinado por espectrometría de masas (ICP).

Las nanopartículas CaSi-1 (NP1) y CaSi-2 (NP2) dispersadas en agua destilada y AGREX-F (dispersante agrícola comercial), presentaron un valor de potencial zeta de +24.6 mV y -15.2 mV respectivamente.

Desarrollo de plantas de *Lilium* en invernadero

El experimento se estableció en un invernadero tipo capilla con cubierta de policarbonato. La temperatura promedio fue de 28 °C durante el día y 17 °C durante la noche, con una radiación fotosintéticamente activa de hasta $560 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en las horas de máxima radiación, y una humedad relativa de 40-70 %. Se utilizaron bulbos de *Lilium* de tipo oriental de la variedad “Table dance” (híbrido de *Lilium auratum* y *Lilium speciosum*). Los bulbos fueron adquiridos en “Viveros el Volcán SA de CV” en el Estado de México, México. Los bulbos se sembraron en bolsas de polietileno de color negro (un bulbo por bolsa) con capacidad de 4 litros, utilizando como sustrato una mezcla de turba y perlita en proporción 1:1 (1 kg por bolsa aproximadamente). Se utilizó un sistema de riego dirigido con solución de Steiner (Steiner, 1961) a una concentración del 25 %, el pH de la solución se ajustó a 6.5.

Caracterización de nanopartículas de Ca-Si

El CaSi-1 y CaSi-2 se caracterizaron por la difracción de rayos X (DRX) (Figura 1A), los difractogramas de ambas muestras presentaron un pico amplio ubicado en 23.19° y 21.38° en la escala 2θ correspondiente a CaSi-1 y CaSi-2 respectivamente (parte amorfa). Además, presentaron picos en $2\theta = 29.3^\circ$ y 32° - 50° correspondientes a la fase cristalina. El diámetro promedio de partícula se calculó con base en el pico de 29.3° y utilizando la ecuación de Debye-Scherrer se determinó que las muestras de CaSi-1 y CaSi-2 presentaron un diámetro de 23.29 nm y 15.29 nm respectivamente.

Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) de las NP CaSi-1 y CaSi-2 para determinar el contenido de calcio y silicio como residuos inorgánicos (Figura 1B). El contenido de residuos inorgánicos en CaSi-1 fue de 62.0 %, mientras que en CaSi-2 fue de 87.0 %.

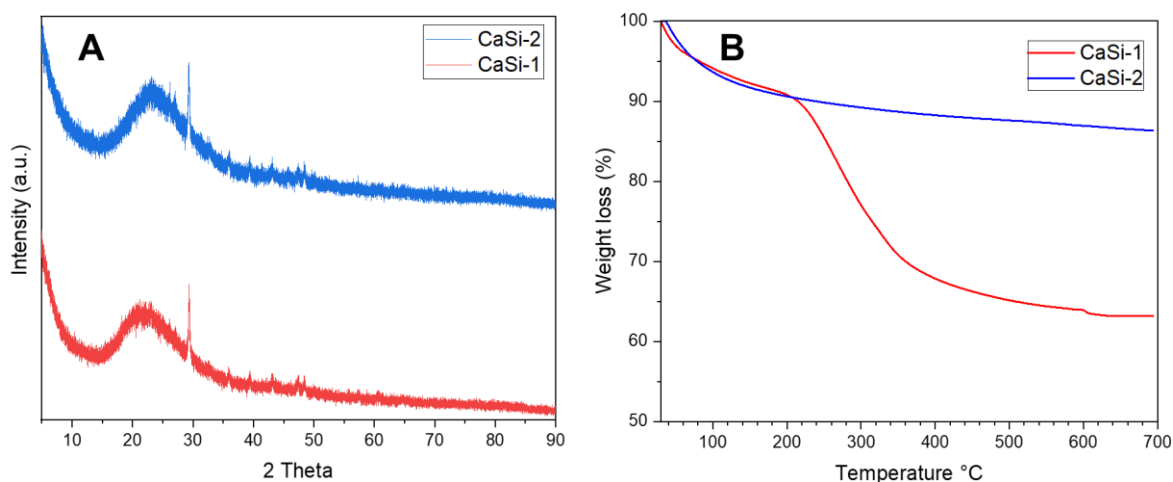


Figura 1. Difractogramas DRX (A) y termogramas TGA (B) de nanopartículas de CaSi-1 y CaSi-2.

Aplicación de tratamientos

El tratamiento consistió en la aplicación foliar de dos tipos de nanopartículas CaSi-1 (NP1) y CaSi-2 (NP2) a dos concentraciones cada una (500 y 750 mg L^{-1}), más un control. Uno de los parámetros a evaluar en este estudio fue la salinidad, para lo cual se realizó la evaluación de cada uno de los tratamientos bajo condiciones de salinidad y sin salinidad. El experimento en condiciones de salinidad se manejó constante desde el surgimiento de

las primeras hojas de *Lilium* y durante todo el desarrollo del cultivo, para ello todos los riegos aplicados fueron con solución Steiner a la que se le adicionó 30 mM de NaCl. Cada experimento consto de cinco tratamientos, con cinco repeticiones, donde cada repetición estuvo compuesta por cuatro plantas (una planta por maceta).

Parámetros de calidad de las flores de *Lilium*

El tamaño de la flor se midió antes de su apertura (longitud de la flor cerrada) y cuando la flor estaba completamente abierta (diámetro de la flor abierta). Además, se determinó el número de flores por planta, la biomasa fresca y seca de las flores y el tiempo de vida de las flores (días desde la apertura de la flor hasta la caída del primer pétalo). El cultivo de *Lilium* se desarrolló durante 119 días desde la siembra de los bulbos.

Variables bioquímicas

Los contenidos de clorofila *a* , *b* y total (mg 100 g⁻¹ PS) se determinaron según el método de Nagata y Yamashita (1992). La muestra liofilizada (10 mg) se mezcló con 2 ml de hexano:acetona (3:2). Posteriormente las muestras fueron sonicadas durante 5 minutos. Después se centrifugaron a 15,000 rpm durante 10 minutos a 4 °C. Se eliminó el sobrenadante y se tomaron las lecturas de las absorbancias a 645 y 663 nm, y los valores obtenidos se utilizaron en las Ecuaciones (1) y (2).

$$\text{Clorofila } a = 0.999 * A_{663} - 0.0989 * A_{645} \quad (1)$$

$$\text{Clorofila } b = 0.328 * A_{663} + 1.77 * A_{645} \quad (2)$$

La vitamina C (mg g⁻¹ PS) se determinó mediante espectrofotometría. Se extrajeron 10 mg de tejido liofilizado con 1 ml de ácido metafosfórico (HPO₃) al 1 % y se filtraron con papel de filtro Whatman No. 1. Para la cuantificación, se tomaron 200 µL de extracto y se mezclaron con 1800 µL de 2,6 diclorofenol-indofenol (100 mM), se tomó lectura de la absorbancia a 515 nm en un espectrofotómetro UV-Vis (Espectrofotómetro UNICO, Modelo UV2150, Dayton, NJ, USA) (Hung y Yen, 2002) .

El contenido de fenoles totales (mg g⁻¹ PS) se obtuvo según Yu y Dahlgren (2000). En total, se extrajeron 100 mg de tejido liofilizado con 1 mL de una solución agua:acetona (1:1) y la mezcla se homogeneizó durante 30 s. Los tubos de muestra se centrifugaron a

17,500 rpm durante 10 minutos a 4 °C. Después, 18 µL del sobrenadante se colocaron en un tubo de ensaye, junto con 70 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu y 175 µL de carbonato de sodio (Na₂CO₃) al 20 %, además de 1750 µL de agua destilada. Las muestras contenidas en los tubos de ensaye se colocaron en un baño de agua a 45 °C durante 30 min. Finalmente, la lectura se tomó a una longitud de onda de 750 nm en el espectrofotómetro UV-Vis, (Espectrofotómetro UNICO, Modelo UV2150, Dayton, NJ, USA). Los fenoles totales se expresaron en mg EQ de ácido gálico por gramo de PS.

El contenido de flavonoides (mg g⁻¹ PS) se determinó según Arvouet-Grand *et al.* (1994). Para la extracción se colocaron 20 mg de tejido liofilizado en un tubo de ensayo al que se le agregaron 2 mL de metanol grado reactivo y este se homogeneizó durante 30 s. La mezcla se filtró usando papel Whatman No. 1. Para la cuantificación, se añadió a un tubo de ensayo 1 mL del extracto y 1 mL de solución metanólica de tricloruro de aluminio (AlCl₃) al 2 % y se dejó reposar durante 20 min en oscuridad. La lectura se tomó a una longitud de onda de 415 nm en el espectrofotómetro UV-Vis (Espectrofotómetro UNICO, Modelo UV2150, Dayton, Nueva Jersey, EE. UU.). Los resultados se expresan en mg EQ de quercetina por gramo de PS.

La capacidad antioxidante se determinó utilizando el método DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) tanto para compuestos hidrofílicos como lipofílicos (Brand-Williams *et al.*, 1995). La capacidad antioxidante total (CAT) se obtuvo añadiendo los compuestos hidrofílicos y lipófilos. La solución madre se preparó mezclando 2,5 mg del radical DPPH con 100 mL de metanol. Posteriormente se tomaron 6 µL del extracto obtenido con buffer de fosfato o hexano:acetona y se agregaron 234 µL del radical DPPH diluido. Se utilizó metanol como blanco. La disminución de la absorbancia a 515 nm se midió después de 30 min. Los compuestos hidrófilos se determinaron utilizando buffer de fosfato como solución de extracción, mientras que para los compuestos lipófilos se utilizó una solución de hexano:acetona. Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido ascórbico (µmol g⁻¹ PS).

El peróxido de hidrógeno (H₂O₂) se evaluó según la metodología descrita por Velikova *et al.* (2000), y se expresa como µmol g⁻¹ de PS. En total, se homogeneizaron 10 mg de muestra liofilizada con 1000 µL de ácido tricloroacético frío (0.1 %). El homogeneizado

se centrifugó a 12.000 rpm durante 15 min y se añadieron 250 μ L del sobrenadante a 750 μ L de buffer de fosfato de potasio (10 mM) (pH 7,0) y 1000 μ L de yoduro de potasio (1 M). La absorbancia del sobrenadante se midió a 390 nm. El contenido de H_2O_2 se proporcionó mediante un patrón.

El malondialdehído (MDA) se determinó según la metodología descrita por Velikova *et al.* (2000), y se expresa como $nmol\ g^{-1}$ de PS. En total, se homogeneizaron 50 mg de muestra liofilizada en 1000 μ L de ácido barbitúrico (TBA) (0.1 %). El homogeneizado se centrifugó a 10,000 rpm durante 20 min y se añadieron 500 μ L del sobrenadante a 1000 μ L de TBA (0,5 %) en ácido tricloroacético (20 %). La mezcla se incubó en agua hirviendo durante 30 minutos y la reacción se detuvo colocando el tubo de reacción en un baño de hielo. Luego, la muestra se centrifugó a 10,000 rpm durante 5 minutos y la lectura de la absorbancia del sobrenadante se realizó a 532 nm. La cantidad de complejo MDA-TBA (pigmento rojo) se calculó a partir del coeficiente de extinción de $155\ mM^{-1}\ cm^{-1}$.

Análisis estadístico

Los experimentos se establecieron bajo un diseño de cuadrado latino considerando cinco repeticiones por tratamiento. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de diferencia mínima significativa de Fisher ($\alpha=0.05$) utilizando el software InfoStat (v2020) (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). Además, se realizó un análisis de conglomerados jerárquico y un análisis de componentes principales utilizando el software Origin (v2016). Para el análisis de conglomerados jerárquico de las variables se utilizó el promedio grupal como método de conglomerados y la correlación de Pearson como tipo de distancia.

RESULTADOS

La salinidad afectó consistentemente el desarrollo y la calidad de las flores de *Lilium*, principalmente el tamaño de las flores, como se observa en las Figuras 2 A y B. Sin embargo, también se observaron efectos positivos con la aplicación de nanopartículas de Ca-Si (Figura 2). En ausencia de estrés salino, los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 aumentaron la longitud de la flor cerrada en un rango de 3 a 4 % en comparación con el testigo (T0). Mientras que en condiciones de salinidad no se observaron diferencias entre tratamientos (Figura 2A). El diámetro de la flor abierta se incrementó con la aplicación de todos los tratamientos cuando las plantas no estuvieron sometidas a estrés salino. Mientras que, bajo estrés salino, solo los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 aumentaron el diámetro de la flor abierta entre 3.8-5.1 % respecto al T0.

La biomasa fresca de flores también aumentó con los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 entre 38.4-57.9 % respecto al T0. Sin embargo, bajo condiciones de estrés salino, no se observaron diferencias entre tratamientos (Figura 2D). El número de flores por planta, la biomasa seca de las flores y la vida útil de las flores no difirieron entre los tratamientos (Figura 2 C, E, F).

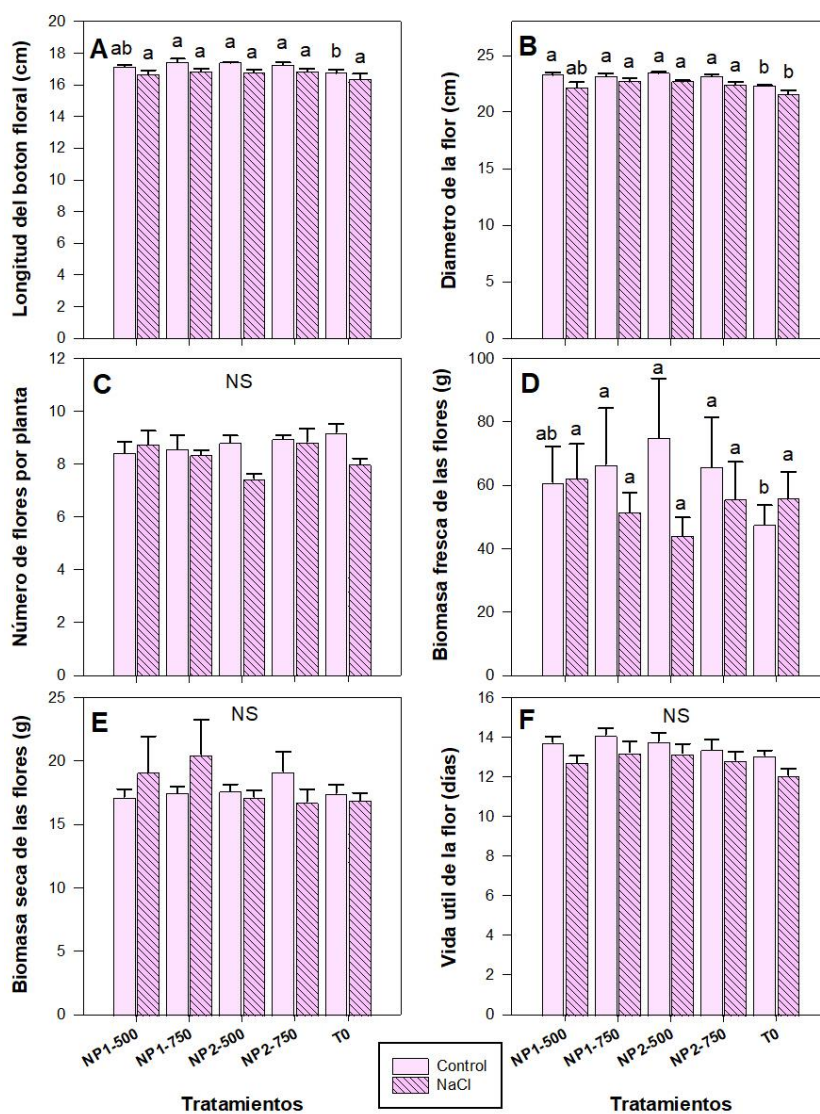


Figura 2. Calidad de flores de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. Longitud del botón floral (A); Diámetro de la flor (B); Número de flores por planta (C); Biomasa fresca de las flores (D); Biomasa seca de las flores (E); Vida útil de la flor (F). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP2-500 y NP2-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher (p<0.05).

El contenido de clorofila a en las hojas de *Lilium* sin estrés salino aumentó significativamente con los tratamientos NP2-500 y NP2-750, 20 % y 27.5 %

respectivamente en comparación con el control. Bajo estrés salino, T0 presentó el menor contenido de clorofila *a*, mientras que los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 lo incrementaron en 19.7 %, 30.7 % y 38.5 % respectivamente (Figura 3A). El contenido de clorofila *b* en las hojas de *Lilium* sin estrés salino no mostró diferencias entre tratamientos. Sin embargo, bajo estrés salino, T0 presentó el menor contenido de clorofila *b*, mientras que los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 lo incrementaron en 16.9 %, 27.7 % y 36.2 % respectivamente (Figura 3B). La clorofila total de hojas de *Lilium* sin estrés salino no mostró diferencias entre tratamientos. Por el contrario, bajo estrés salino los tratamientos NP1-750, NP2-500 y NP2-750 aumentaron la clorofila total en un 19.4 %, 30.2 % y 38.1 % respectivamente en comparación con T0 (Figura 3C). La relación clorofila *a/b* no presentó estadísticamente diferencias entre tratamientos independientemente de la condición de salinidad. Sin embargo, gráficamente se observó que la salinidad disminuyó la relación clorofila *a/b* (Figura 3D).

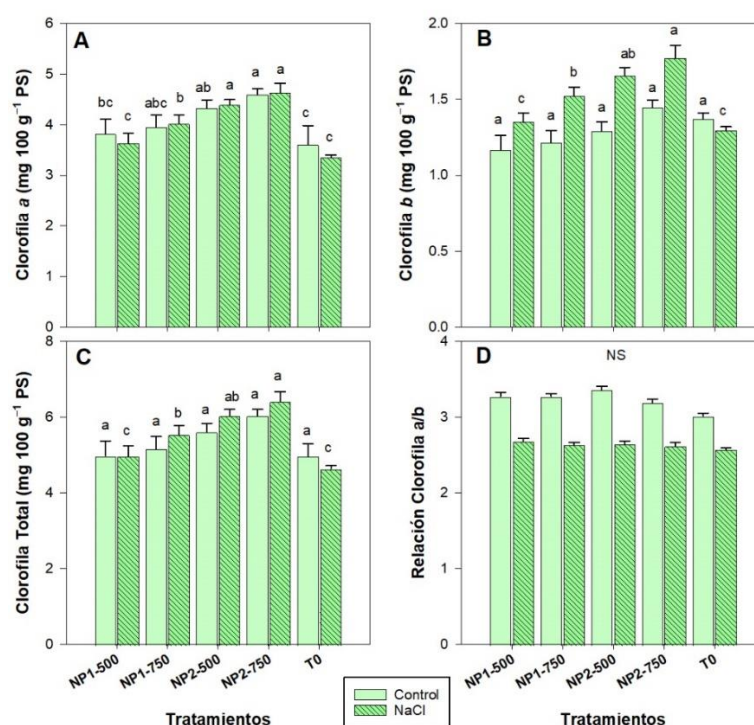


Figura 3. Contenido de clorofilas y relación de clorofilas *a/b* en hojas de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. Clorofila *a* (A); Clorofila *b* (B); Clorofila total (C); Relación clorofila *a/b* (D). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP2-500 y NP2-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró

diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p < 0.05$).

La aplicación de nanopartículas de Ca-Si no modificó el contenido de clorofila en las flores de *Lilium* independientemente de la condición de salinidad a las que fueron sometidas. Sólo se observó que la salinidad aumentó el contenido de clorofila, mientras que la relación clorofila a/b disminuyó (Figura 4).

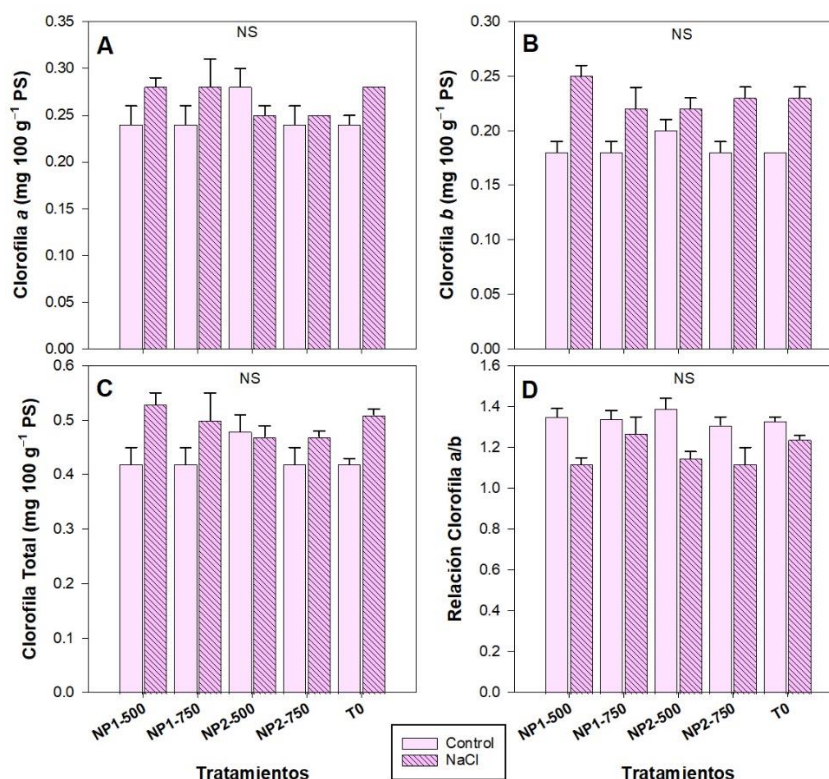


Figura 4. Contenido de clorofilas y relación de clorofilas a/b en flores de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. Clorofila a (A); Clorofila b (B); Clorofila Total (C); Relación clorofila a/b (D). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP2-500 y NP2-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El contenido de antioxidantes en las hojas de *Lilium* se vio modificado tanto por la salinidad como por la aplicación de nanopartículas. El contenido de vitamina C aumentó 84.7 % con el tratamiento NP2-500 respecto al T0 cuando no se aplicó salinidad. Mientras

que, en condiciones de salinidad, el tratamiento NP1-500 aumentó el contenido de vitamina C en un 9.4 % en comparación con el control (Figura 5A). El contenido de fenoles no cambió por efecto de los tratamientos cuando las plantas no estuvieron sometidas a salinidad. En contraste, la aplicación de salinidad indujo un aumento en el contenido de fenoles, ya que T0 presentó la mayor cantidad de estos compuestos junto con el tratamiento NP1-750, mientras que los tratamientos NP1-500, NP2-500 y NP2-750 presentaron menos fenoles que T0 (Figura 5B). Por otro lado, el contenido de flavonoides no fue modificado por los tratamientos aplicados, independientemente de la condición de salinidad (Figura 5C).

La capacidad antioxidante fue modificada tanto por la condición de salinidad como por el efecto de las nanopartículas, y el efecto fue diferente según la naturaleza del grupo de compuestos analizados, es decir, hidrofílicos o lipofílicos. El control presentó la mayor capacidad antioxidante en los compuestos hidrófilos, en contraste, el tratamiento NP2-500 presentó la menor capacidad antioxidante (-15.8 % respecto a T0), seguido de los tratamientos NP2-750 y NP1-750 (-13.5 % y -12 % respectivamente). Cuando las plantas fueron sometidas a estrés salino, el control (T0) presentó la menor capacidad antioxidante, mientras que los tratamientos NP1-500 y NP1-750 la aumentaron en 24.3 % y 33.4 % respectivamente (Figura 5D). La capacidad antioxidante de los compuestos lipofílicos sólo fue modificada por los tratamientos con nanopartículas cuando las plantas fueron sometidas a salinidad. Bajo esta condición, T0 presentó la menor capacidad antioxidante, mientras que todos los tratamientos con nanopartículas la incrementaron en un rango de 14.3-19.3 % (Figura 5E). La capacidad antioxidante total no presentó diferencias significativas entre tratamientos en plantas sin estrés salino. En contraste, bajo estrés salino, T0 presentó la menor capacidad antioxidante, mientras que los tratamientos NP1-500, NP1-750 y NP2-500 la aumentaron en un rango de 19.2-23.8 % (Figura 5F).

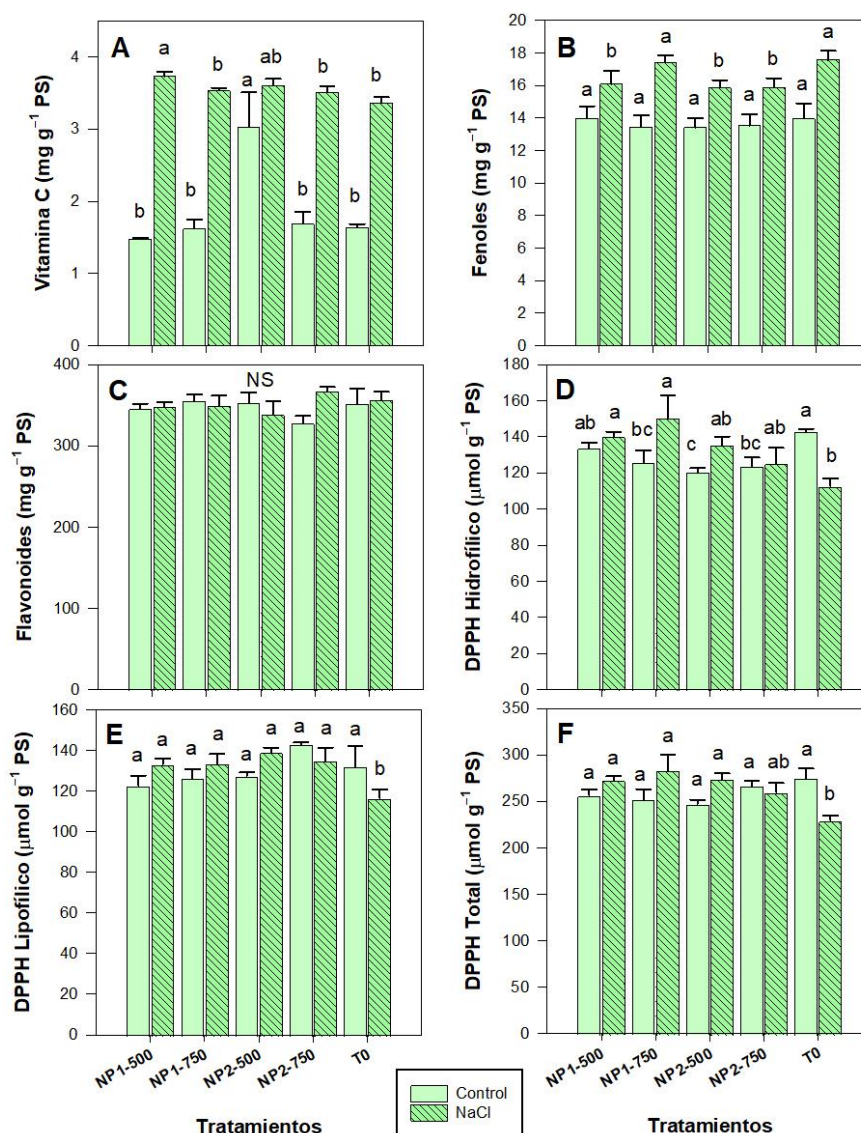


Figura 5. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en hojas de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. Vitamina C (A); Fenoles (B); Flavonoides (C); DPPH hidrofílico (D); DPPH lipofílico (E); DPPH Total (F). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP2-500 y NP2-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher (p<0.05).

En las flores de *Lilium*, la salinidad aumentó el contenido de fenoles y flavonoides (Figura 6 B y C). La vitamina C en flores de *Lilium* sin estrés salino solo aumentó con el

tratamiento NP1-750, un 40 % en comparación con T0. Sin embargo, bajo condiciones de salinidad no hubo diferencias entre tratamientos (Figura 6A). El contenido de fenoles no presentó diferencias entre los tratamientos con nanopartículas y T0 independientemente de la condición de salinidad (Figura 6B). El menor contenido de flavonoides se presentó en el T0 cuando las plantas no fueron sometidas a estrés salino, mientras que los tratamientos NP1-750 y NP2-500 lo incrementaron en un 17.6 % y 23.7 % respectivamente. En condiciones de salinidad no se observaron diferencias entre tratamientos (Figura 6C).

La capacidad antioxidante de los compuestos hidrofílicos de las flores de *Lilium* sin estrés salino aumentó con los tratamientos NP1-500, NP2-500 y NP2-750 en un rango de 11.6-21 % respecto al T0. En contraste, en condiciones de salinidad, T0 presentó la mayor capacidad antioxidante, siendo superior a todos los tratamientos con nanopartículas (Figura 6D). En los compuestos lipofílicos de las flores de *Lilium* sin estrés salino, los tratamientos NP2-500 y NP2-750 presentaron la menor capacidad antioxidante, siendo -14.6 % y -10.4 % respecto al T0. Mientras que, bajo estrés salino, T0 presentó la mayor capacidad antioxidante, siendo el tratamiento NP2-750 el que presentó menor actividad antioxidante (-15.5 %) (Figura 6E). La capacidad antioxidante total no presentó diferencias entre tratamientos en flores de *Lilium* sin estrés salino. Por el contrario, bajo estrés salino, T0 presentó la mayor capacidad antioxidante, superando a todos los tratamientos con nanopartículas (Figura 6F).

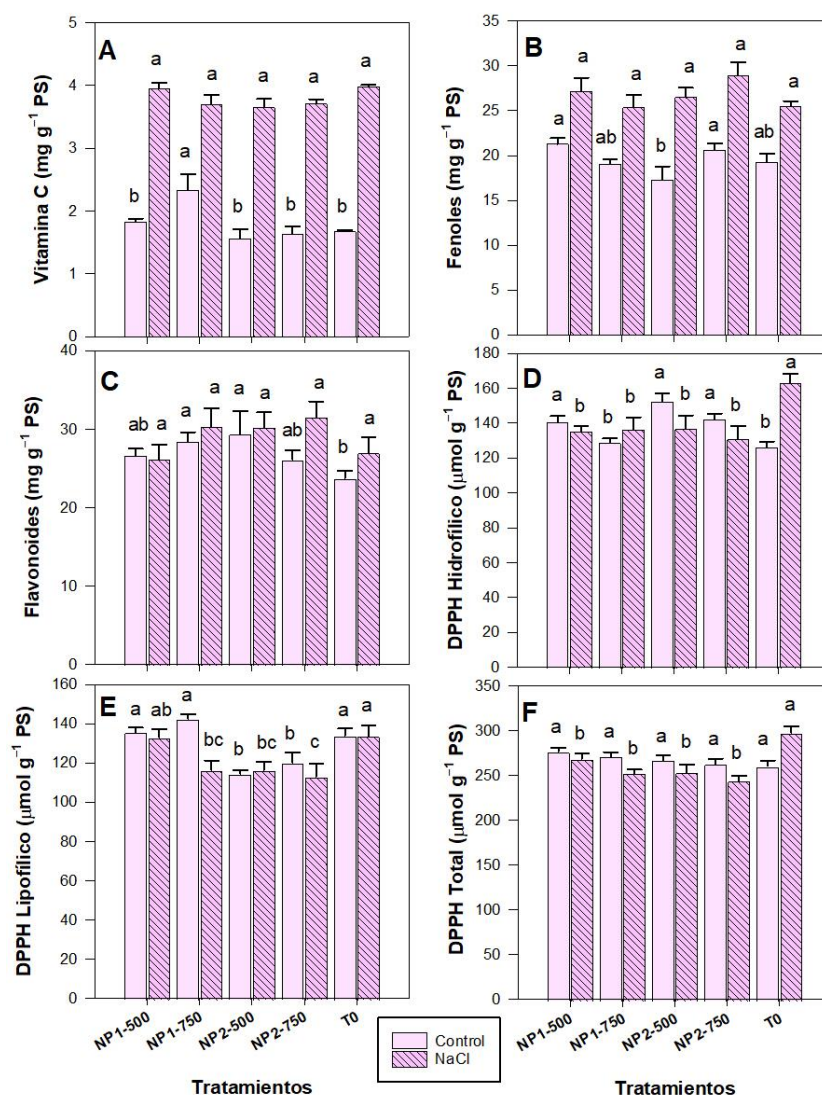


Figura 6. Contenido de antioxidantes y capacidad antioxidante en flores de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. Vitamina C (A); Fenoles (B); Flavonoides (C); DPPH hidrofílico (D); DPPH lipofílico (E); DPPH Total (F). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP2-500 y NP2-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El contenido de peróxido de hidrógeno en hojas de *Lilium* sin estrés salino no mostró diferencias entre tratamientos. Mientras que bajo estrés salino el tratamiento NP1-500 presentó el mayor contenido de peróxido de hidrógeno y el tratamiento NP2-750 el menor

contenido, sin embargo, ninguno de estos tratamientos fue diferente al T0 (Figura 7A). El contenido de MDA aumentó con todos los tratamientos con nanopartículas en comparación con T0 cuando las plantas no fueron sometidas a estrés salino. Sin embargo, bajo estrés salino, no hubo diferencias entre los tratamientos (Figura 7B).

En flores de *Lilium* sin estrés salino, el contenido de peróxido de hidrógeno aumentó con los tratamientos NP1-750 y NP2-750 en un 16.7 % y 13.2 %, respectivamente, en comparación con el control. Bajo estrés salino, no hubo diferencias entre tratamientos en el contenido de peróxido de hidrógeno en las flores de *Lilium* (Figura 7C). El contenido de MDA en flores de *Lilium* sin estrés salino aumentó con el tratamiento NP2-750, 29.8 % respecto al T0. Bajo estrés salino, el contenido de MDA en las flores de *Lilium* fue mayor en el tratamiento NP1-750, 51.3 % respecto al T0; sin embargo, todos los tratamientos aumentaron significativamente el contenido de MDA con respecto a T0 en un rango de 22.6-51.3 % (Figura 7D).

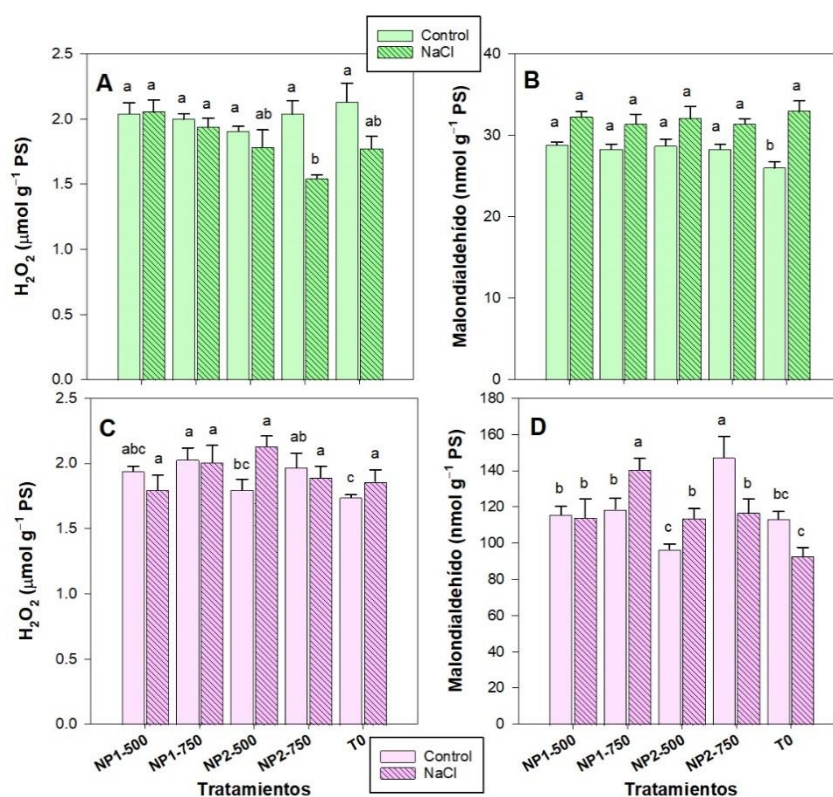


Figura 7. Contenido de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y malondialdehído (MDA) en hojas y flores de *Lilium* tratadas con nanopartículas de Ca-Si. H_2O_2 (A); MDA (B); H_2O_2 (C);

MDA (D). NP Ca-Si 1 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); NP Ca-Si 2 a 500 y 750 mg L⁻¹ (NP1-500 y NP1-750); Testigo (T0). Estrés salino (NaCl); No se encontró diferencias (NS). Letras diferentes por columna indican diferencias significativas de acuerdo a la Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p < 0.05$).

El análisis de conglomerados jerárquico en *Lilium* sin estrés salino presenta cuatro grupos principales de variables: 1) número de flores por planta, biomasa seca de flores, clorofilas en hojas (*a*, *b* y total), capacidad antioxidante de compuestos lipófilos en hojas y contenido de MDA en flores; 2) vitamina C en flores, capacidad antioxidante de los compuestos lipófilos en flores y peróxido de hidrógeno en flores; 3) fenoles en hojas y flores, capacidad antioxidante de compuestos hidrofílicos y totales en hojas, y peróxido de hidrógeno en hojas; 4) es el grupo con más variables, donde se encuentran el resto (Figura 8A). En el análisis de componentes principales se observa que el control (T0) está asociado principalmente a la actividad antioxidante total y al peróxido de hidrógeno en las hojas. Por el contrario, el tratamiento NP2-500 se asocia principalmente con la capacidad antioxidante de los compuestos hidrofílicos en las flores, la vitamina C en las hojas y la clorofila en las flores. Los tratamientos NP1-500 y NP1-750 están asociados con vitamina C en flores, flavonoides en hojas y la capacidad antioxidante total en flores (Figura 8B).

En plantas de *Lilium* sometidas a estrés salino, el análisis de conglomerados jerárquico muestra cinco grupos de variables principales: 1) número de flores por planta, biomasa de flores frescas, clorofila *b* en flores y flavonoides en hojas; 2) biomasa seca de flores, peróxido de hidrógeno en hojas, clorofila *a* y total en flores; 3) relación clorofila *a/b* en flores y fenoles en hojas, 4) vitamina C y capacidad antioxidante (hidrofílica, lipófila y total) en flores y MDA en hojas; el grupo cinco es el más grande y agrupa el resto de variables (Figura 8C). En el biplot se observa que los tratamientos NP1-500 y NP2-750, así como el control (T0) no se encuentran relacionados con variables. En contraste, el tratamiento NP1-750 está estrechamente relacionado con la capacidad antioxidante de los compuestos hidrofílicos y la capacidad antioxidante total en hojas, la vitamina C y la relación clorofila *a/b* en hojas, y con MDA en flores. En el otro cuadrante se observa que el tratamiento NP2-500 se asocia con clorofilas (*a*, *b* y total) en hojas, así como con flavonoides en flores (Figura 8D).

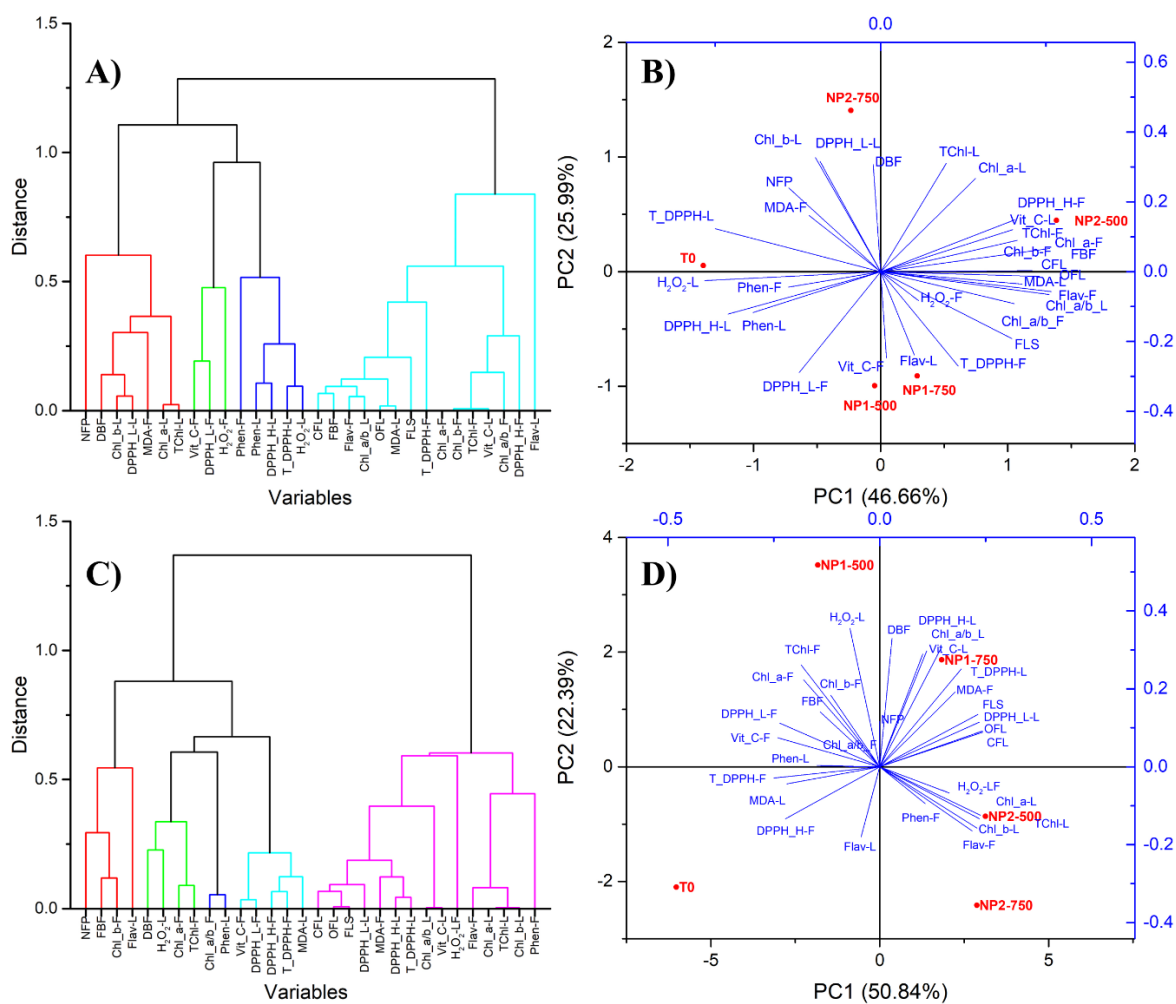


Figura 8. Análisis de conglomerado jerárquico y Biplot de los tratamientos y variables de respuesta de *Lilium* tratado con nanopartículas de Ca-Si sin estrés salino (A, B) y bajo estrés salino (C, D).

DISCUSIÓN

Es claro que la salinidad afecta el desarrollo de las plantas en general, en este trabajo se observó un impacto negativo por la salinidad en el desarrollo y calidad de las flores de *Lilium*, afectando especialmente el tamaño de la flor (Figura 2). Como es bien sabido, la salinidad afecta negativamente el desarrollo de las plantas debido a tres componentes principales: estrés osmótico, estrés iónico (toxicidad iónica por la absorción de Na^+) y el estrés secundario (desequilibrio hormonal, disminución de la capacidad fotosintética de las plantas) por la sobreproducción de ROS (Li *et al.*, 2022; Shams & Khadivi, 2023). Todos estos impactos negativos se traducen en disminución de biomasa y productividad vegetal, como se ha observado en plantas de maíz cultivadas bajo 100 mM de NaCl (-63.8 % biomasa seca) (Liu *et al.*, 2022), en plantas de Mijo poroso (*Panicum miliaceum* L.) bajo condiciones de salinidad de 150 mM de NaCl (-49.4 % biomasa) (Rasool *et al.*, 2022), en plantas de haba (*Vicia faba* L.) desarrolladas bajo 150 mM de NaCl (-29 % y -138 % de peso seco en raíces y brotes, respectivamente) (Mogazy & Hanafy, 2022) y en plantas de guisantes (*Pisum sativum* L.) desarrolladas bajo 250 mM de NaCl (-64.48 % de rendimiento del cultivo) (Ismail *et al.*, 2022).

Sin embargo, la aplicación de nanopartículas de Ca-Si indujo efectos positivos, especialmente en el tamaño de la flor (Figura 1). Las nanopartículas tienen al menos una dimensión menor que 100 nm, lo que les confiere una alta área superficie y por consecuencia propiedades fisicoquímicas únicas, como una estructura superficial atípica y una mayor reactividad debido a su tamaño nanométrico, estructura superficial y composición química, estabilidad, forma y aglomeración de nanopartículas (Wang *et al.*, 2016). Debido a estas características, se han observado efectos positivos en algunos cultivos. Seydmohammadi *et al.* (2020), demostraron que la aplicación foliar de NP de ZnO en lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) aumentó el número de hojas y ramas laterales, el contenido de clorofila de las hojas, el contenido de antocianinas en los pétalos y el número de flores, mientras que las NP de CaCO_3 aumentaron el número de flores por planta, diámetro de la flor, altura de la planta y longitud de la hoja. La aplicación de NP de Ca en *Prunus persica* L., disminuyó el estrés salino al inducir un aumento en el contenido de pectinato de calcio, mejoró la actividad de la calmodulina y reguló

positivamente los genes *fPpMYB10.1* y *PpUFGT* que reducen el agrietamiento del fruto generado por la salinidad (Zhu *et al.*, 2023). Las nanopartículas de silicio indujeron tolerancia al estrés salino en plantas de *Coriandrum sativum* L., por medio de un aumento en el contenido de fenoles, flavonoides, ácido ascórbico, prolina y tiamina, fitohormonas como ácido giberélico (GA) y ácido indolacético (AIA), también aumentaron la tasa fotosintética, conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua, promoviendo la resistencia a la sequía y la salinidad (Mahmoud *et al.*, 2023).

En el cultivo de *Lilium*, el uso de nanomateriales ha sido eficiente para inducir resultados positivos en las plantas. En los lirios orientales, las NP de Ag estimularon el crecimiento de las plantas y se manifiesta por una mayor acumulación de biomasa de hojas y bulbos y una floración acelerada, un mayor índice de verdor de las hojas, formaron más flores y florecieron por más tiempo; además, las hojas acumularon el mayor contenido de clorofila *a*, clorofila *b* y carotenoides (Salachna *et al.*, 2019). En *Lilium candidum* L., la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc aumentó el contenido de ácido p-cumárico, clorogénico y cafeico en los bulbos formados bajo luz fluorescente (Pałka *et al.*, 2023). Sánchez-Navarro *et al.* (2021) evaluaron la aplicación de NP de SiO₂ en *Lilium orientalis* aplicadas por dos vías (foliar y suelo) y observaron que la aplicación foliar de las NP indujo una mayor vida útil de las flores, mayores contenidos de Mg, P y S, más pigmentos fotosintéticos, actividad glutatión peroxidasa, fenoles y mayor capacidad antioxidante.

Además, se ha demostrado que se han utilizado varios nanomateriales para mejorar la tolerancia a la salinidad por parte de las plantas, obteniendo buenos resultados, y se han propuesto los principales mecanismos que conducen a estos resultados, entre los que destacan la homeostasis de las ROS a través del sistema antioxidante, homeostasis de Na⁺/K⁺, la regulación hormonal y modulación del metabolismo secundario (González-García *et al.*, 2023; Juárez-Maldonado, 2023; Li *et al.*, 2022). La mejora en uno o varios de estos mecanismos da como resultado una mayor tolerancia a la salinidad por parte de las plantas. La aplicación de NPs de CaP al suelo en plantas de haba (*V. faba* L.) bajo estrés por NaCl (150 mM) mejoró el rendimiento de la planta (30 %). Los autores atribuyen este efecto al aumento de los azúcares solubles totales, las enzimas antioxidantes, el contenido de prolina y los fenoles totales (Nasrallah *et al.*, 2022). En

plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) desarrolladas bajo salinidad (100 mM de NaCl), la aplicación foliar de nanopartículas de dióxido de silicio disminuyó los efectos adversos del estrés salino debido al ajuste osmótico por el aumento significativo de prolina, aminoácidos libres, glicin betaína, azúcares y el aumento del sistema antioxidante, debido a la actividad de las enzimas SOD, CAT, APX, PAL y por el contenido de fenoles, flavonoides y antocianinas (Hajihashemi & Kazemi, 2022).

La productividad de los cultivos, en particular su capacidad para producir biomasa, depende directamente de su capacidad fotosintética. Para este proceso son fundamentales los pigmentos fotosintéticos como las clorofilas y los carotenoides, ya que son los compuestos encargados de captar la luz solar para luego convertirla en energía bioquímica y finalmente en carbohidratos y biomasa. En este trabajo se observó un impacto positivo de la aplicación de NPs Ca-Si sobre el contenido de clorofila, lo que potencialmente podría mejorar la capacidad fotosintética de las plantas de *Lilium* (Figura 2). Hasta ahora, se sabe que la aplicación de nanopartículas regula el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de tres vías principales: la regulación del sistema de defensa antioxidante, la regulación de hormonas vegetales endógenas y la regulación transcripcional de genes relacionados con el estrés (Tripathi *et al.*, 2022). Además, las nanopartículas protegen el aparato fotosintético mediante la regulación de la homeostasis redox y la biosíntesis de enzimas y compuestos antioxidantes cuando las plantas se encuentran en condiciones de estrés salino, lo que resulta en una mayor acumulación de pigmentos fotosintéticos (Sarkar *et al.*, 2022). Algunos nanomateriales, como los nanotubos de carbono, pueden inducir la producción de clorofilas y carotenoides, también pueden actuar como fuente de carbono que facilita la fijación del carbono y aumenta la velocidad del transporte de electrones, induciendo así una mejora en la fotosíntesis (Lahiani *et al.*, 2018). Este efecto se ha registrado en otros cultivos como el arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado en suelo salino-sódico (Ahmed *et al.*, 2023). Los autores observaron que la aplicación de nanopartículas de sulfato de zinc (NP de ZnSO_4) al suelo (5 y 10 mg kg^{-1}) aumentó el contenido de clorofila en un 91 %, mientras que la tasa de fotosíntesis aumentó en un 113 %, las características agronómicas de las plantas también se vieron mejoradas. En plantas de haba (*Vicia faba* L.) cultivadas bajo estrés salino a 150 mM de NaCl, la aplicación de 50 mg L^{-1} aumentó el contenido de clorofila *a*, clorofila *b*, carotenoides y pigmentos totales

(Mogazy y Hanafy, 2022). En plantas de calabaza (*Cucurbita pepo* L.) cultivadas en suelo salino, la aplicación foliar de nanopartículas de potasio ($0,50 \text{ g K L}^{-1}$) incrementó el contenido de clorofilas y carotenoides (16.3 % y 6.5 % respectivamente), así como la eficiencia fotosintética (F_v/F_m), índice de rendimiento (PI), contenido relativo de agua (CRA) e índice de estabilidad de membrana (MSI), esto influyó positivamente en el crecimiento, las características de rendimiento y la calidad de la fruta (Rady *et al.*, 2023). Aazami *et al.* (2022), evaluaron la aplicación de óxido de grafeno al suelo (50 y 100 g kg^{-1}) y la aplicación foliar de nanopartículas de Fe_3O_4 (3 mg L^{-1}) en plantas de *Vitis vinifera* L. cultivadas bajo salinidad (50 y 100 mM de NaCl), observaron que la mayor cantidad de clorofila *b* se obtuvo mediante la aplicación de NP de Fe, y las cantidades más altas de clorofila total bajo la aplicación de óxido de grafeno de $50 \text{ g kg}^{-1} \times$ NP de Fe. Los autores concluyeron que el tratamiento con óxido de grafeno (50 g kg^{-1}) \times Fe NP mejoró los efectos adversos de la salinidad con mejores respuestas bioquímicas y fisiológicas de *V. vinifera*.

El contenido de antioxidantes y la capacidad antioxidante en las hojas de *Lilium* fueron modificados tanto por la salinidad como por la aplicación de nanopartículas. El contenido de vitamina C aumentó con la aplicación de NP Ca-Si (Figura 5A), mientras que la salinidad indujo un aumento en el contenido de fenol (Figura 5B). Bajo estrés salino, las NP Ca-Si aumentaron la actividad antioxidante total (Figura 5F). En el caso de las flores de *Lilium*, la salinidad aumentó el contenido de fenoles y flavonoides (Figura 6A y 6B), mientras que el contenido de vitamina C y flavonoides en las flores de *Lilium* sin estrés salino aumentó con las NP Ca-Si (Figura 6 A y C). Por otro lado, la capacidad antioxidante de los compuestos hidrofílicos en las flores de *Lilium* sin estrés salino aumentó con los tratamientos con las NP Ca-Si (Figura 6D). En contraste, en condiciones de salinidad, T0 presentó la mayor capacidad antioxidante total y de compuestos hidrofílicos (Figura 6 D y F).

Las modificaciones en el contenido de antioxidantes así como en la capacidad antioxidante debido a la salinidad que se observaron tanto en hojas como en flores de *Lilium* está directamente ligada a los diferentes impactos que induce este tipo de estrés, como el estrés osmótico o el estrés secundario, pero principalmente a la sobreproducción de ROS que

potencialmente puede resultar en estrés oxidativo (Li *et al.*, 2022; Shams y Khadivi, 2023). La alta salinidad provoca una producción excesiva de ROS en las plantas, evidenciada por una alta fuga de H₂O₂, MDA y electrolitos, mientras que para contrarrestar los efectos negativos de las ROS, se requiere aumentar la producción de compuestos antioxidantes enzimáticos (ascorbato peroxidasa, guaiacol peroxidasa, superóxido dismutasa y catalasa) y no enzimáticos (ácido ascórbico, glutatión, fenoles totales y flavonoides) para regular las ROS (Azeem *et al.*, 2023; Shams y Khadivi, 2023). Además de la producción de ROS, la salinidad también induce la producción de especies reactivas de nitrógeno (RNS) y especies reactivas de azufre (RSS), las RNS son moléculas reactivas de radicales libres y no radicales, mientras que las RSS son agentes fuertemente oxidantes que atacan preferiblemente al grupo funcional tiol. Estas moléculas pueden interactuar con moléculas de señalización o vías biosintéticas de fitohormonas que regulan el metabolismo, el crecimiento y el desarrollo de las plantas y, en última instancia, pueden inducir tolerancia a la salinidad (Mangal *et al.*, 2023). En plantas de mijo poroso bajo estrés salino (150 mM de NaCl) se observó que los efectos adversos del estrés disminuyeron cuando se incrementó la actividad de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa, catalasa, ascorbato peroxidasa, guaiacol peroxidasas, glutatión-S-transferasas y glutatión reductasa, lo que resulta en una disminución en el contenido de H₂O₂ (Rasool *et al.*, 2022).

Por su parte, los nanomateriales pueden modificar el sistema de defensa antioxidante (compuestos enzimáticos y no enzimáticos) y el metabolismo secundario (fenoles, flavonoides, etc.) y así neutralizar la sobreproducción de ROS (González-García *et al.*, 2023; Juárez-Maldonado, 2023; Li *et al.*, 2022). La aplicación de nanopartículas de óxido de cerio (NP de CeO₂) en maíz (*Zea mays* L.) bajo estrés salino (100 mM de NaCl) mejoró la tolerancia a la salinidad debido a tres mecanismos, mantuvo la homeostasis de Na⁺/K⁺, mejoró la eficiencia fotosintética y disminuyó las ROS (Liu *et al.*, 2022). Los autores observaron mediante un análisis de transcriptoma que los genes relacionados con el sistema de defensa antioxidante volvieron a su nivel normal tras la aplicación de NP de CeO₂. Mogazy & Hanafy (2022) observaron que la aplicación de NPs de ZnO en plantas de haba (*V. faba* L.) sometidas a estrés salino (150 mM de NaCl) ayudó a reducir los efectos negativos de la salinidad, debido a la acumulación de antioxidantes enzimáticos y

no enzimáticos (ácido ascórbico, α -tocoferol, glutatión, peroxidasa, catalasa, polifenol oxidasa), osmolitos (aminoácidos, prolina, glicina betaína y azúcares solubles totales) y metabolitos secundarios (fenoles, flavonoides y taninos). Además, los autores observaron que la aplicación de 50 mg L⁻¹ de las NP de ZnO disminuyeron el contenido de malondialdehído (MDA) y peróxido de hidrogeno (H₂O₂), además de estimular una reducción significativa de la fuga de la membrana plasmática en las hojas de las plantas en comparación con el grupo estresado por salinidad.

Sayed *et al.* (2022), informaron que la aplicación foliar de nanopartículas de silicio (NP de Si) mejoró la tolerancia a la salinidad en plantas de tomate injertadas. El crecimiento de la planta, el rendimiento del fruto, la calidad del fruto (contenido de vitamina C y porcentaje de SST), el contenido de minerales, GA₃, ABA y los niveles de prolina del tomate injertado aumentaron mediante la aplicación foliar de NP de Si. Ismail *et al.* (2022), observaron resultados similares en plantas de guisantes (*Pisum sativum* L.) bajo estrés salino (100, 150, 200 y 250 mM de NaCl) al aplicar nanopartículas de SiO₂ (NP de SiO₂). Con la aplicación de NPs de SiO₂ se mejoró el crecimiento vegetativo y el contenido relativo de agua (CRA), la altura de la planta, el peso fresco y seco, el rendimiento total y los sistemas de defensa antioxidantes, así como aumento el contenido de K⁺ en raíces y brotes, mientras que se disminuyó el contenido de Na⁺. Particularmente en el sistema de defensa antioxidante, se observó que el estrés salino sobreexpresaba los genes *SOD*, *POD* y *PslecRLK*, así como la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasas (POD); sin embargo, la aplicación de NP de SiO₂ indujo una significativa regulación negativa en la expresión de genes, así como una disminución en la actividad de las enzimas. Por el contrario, se observó que la actividad de la catalasa (CAT) disminuía con la salinidad, pero la aplicación de NPs de SiO₂ revirtió este efecto aumentando la actividad de esta enzima. La aplicación de NP de Ca en plantas de azafrán (*Crocus sativus* L.) incrementó los parámetros morfológicos y bioquímicos. En concreto, las NP de Ca aumentaron el contenido de pigmentos de clorofila (*a*, *b* y total) y carotenoides, flavonoides totales y la actividad CAT y POX, así como el contenido de crocina, picrocrocina y safranal (Badihi *et al.*, 2021).

Con esto, queda claro que el impacto positivo de las nanopartículas de Ca-Si en el cultivo de *Lilium* se debe en gran medida a una mejora en el sistema de defensa antioxidante, así como a otros mecanismos como la homeostasis del K^+/Na^+ y la regulación osmótica. Los nanomateriales en general, por su tamaño nanométrico (<100 nm en al menos una dimensión), inducen la producción de metabolitos secundarios (fenoles, flavonoides, etc.) mediante la producción y señalización por ROS, así como por la inducción de cambios en la expresión de genes relacionados con rutas metabólicas del metabolismo secundario (Anjum *et al.*, 2019; González-García *et al.*, 2023). Los metabolitos secundarios junto con los compuestos antioxidantes dan a las plantas la capacidad de tolerar el estrés (Anjum *et al.*, 2019), como se observa en el presente estudio.

CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de Ca-Si en plantas de *Lilium* indujo efectos positivos en la calidad de las flores, especialmente en el tamaño de las flores y la biomasa fresca. Por su parte, la salinidad afectó sistemáticamente la calidad de las flores de *Lilium* así como los parámetros bioquímicos. Por el contrario, la aplicación de NP Ca-Si en *Lilium* bajo estrés salino mejoró los parámetros bioquímicos, ya que aumentó el contenido de clorofilas, vitamina C y la capacidad antioxidante en las hojas. Los indicadores de estrés, H_2O_2 y MDA, aumentaron en general con la aplicación de NP Ca-Si, lo que parece indicar dos cosas importantes: la salinidad no indujo un estrés significativo en las plantas de *Lilium*, en contraste, la aplicación de las NP al parecer indujo mayor estrés que la salinidad. Esto parece indicar que la estimulación del sistema antioxidante en plantas de *Lilium* mediante la aplicación de NP Ca-Si se debe a la inducción del estrés oxidativo, es decir, la producción de ROS y MDA. El uso de NP Ca-Si puede ser una opción para mejorar la calidad de las flores de *Lilium*, sin embargo, es necesario realizar estudios más profundos para conocer en detalle los mecanismos mediante los cuales funcionan.

REFERENCIAS

- Aazami, M.A., Mehrabani, L.V., Hashemi, T., Hassanpouraghdam, M.B., Rasouli, F., 2022. Soil-based nano-graphene oxide and foliar selenium and nano-Fe influence physiological responses of “Sultana” grape under salinity. *Sci. Rep.* 12, 4234.
- Ahmed, R., Zia-ur-Rehman, M., Sabir, M., Usman, M., Rizwan, M., Ahmad, Z., Alharby, H.F., Al-Zahrani, H.S., Alsamadany, H., Aldhebiani, A.Y., Alzahrani, Y.M., Bamagoos, A.A., 2023. Differential response of nano zinc sulphate with other conventional sources of Zn in mitigating salinity stress in rice grown on saline-sodic soil. *Chemosphere* 327, 138479.
- Anjum, S., Anjum, I., Hano, C., Kousar, S., 2019. Advances in nanomaterials as novel elicitors of pharmacologically active plant specialized metabolites: current status and future outlooks. *RSC Adv.* 9, 40404–40423.
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., Legret, P., 1994. Standardization of a propolis extract and identification of the main constituents. *J. Pharm. Belg.* 49, 462–468.
- Azeem, M., Pirjan, K., Qasim, M., Mahmood, A., Javed, T., Muhammad, H., Yang, S., Dong, R., Ali, B., Rahimi, M., 2023. Salinity stress improves antioxidant potential by modulating physio-biochemical responses in *Moringa oleifera* Lam. *Sci. Rep.* 13, 1–17.
- Badihi, L., Gerami, M., Akbarinodeh, D., Shokrzadeh, M., Ramezani, M., 2021. Physio-chemical responses of exogenous calcium nanoparticle and putrescine polyamine in Saffron (*Crocus sativus* L.). *Physiol. Mol. Biol. Plants* 27, 119–133.
- Bai, R., Lin, Y., Jiang, Y., 2021. Diverse genotypic variations of photosynthetic capacity, transpiration and antioxidant enzymes of lily hybrids to increasing salinity stress. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 280, 109939.
- Bañón, D., Lorente, B., Ortuño, M.F., Bañón, S., Sánchez-Blanco, M.J., Alarcón, J.J., 2022. Effects of saline irrigation on the physiology and ornamental quality of *Euphorbia Ascot Rainbow* and its relationship with salinity indexes based on the bulk electrical conductivity. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 305, 111406.

- Brand-Williams, W., Cuvelier, M.E., Berset, C., 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Sci. Technol.* 28, 25–30.
- González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., Juárez-Maldonado, A., 2023. Nanomaterials as novel elicitors of plant secondary metabolites. In: Ingle, A.P. (Ed.), *Nanotechnology in Agriculture and Agroecosystems*. Elsevier, pp. 113–139.
- Hajihashemi, S., Kazemi, S., 2022. The potential of foliar application of nano-chitosan-encapsulated nano-silicon donor in amelioration the adverse effect of salinity in the wheat plant. *BMC Plant Biol.* 22, 1–15.
- Huang, C.Y., Huang, T.H., Kao, C.T., Wu, Y.H., Chen, W.C., Shie, M.Y., 2017. Mesoporous Calcium Silicate Nanoparticles with Drug Delivery and Odontogenesis Properties. *J. Endod.* 43, 69–76.
- Hung, C.Y., Yen, G.C., 2002. Antioxidant activity of phenolic compounds isolated from *Mesona procumbens* Hemsl. *J. Agric. Food Chem.* 50, 2993–2997.
- Ismail, L.M., Soliman, M.I., Abd El-Aziz, M.H., Abdel-Aziz, H.M.M., 2022. Impact of Silica Ions and Nano Silica on Growth and Productivity of Pea Plants under Salinity Stress. *Plants* 11, 1–21.
- Juárez-Maldonado, A., 2023. Influence of Nanomaterials on Non-enzymatic Antioxidant Defense Activities in Plants. In: *Nanomaterial Interactions with Plant Cellular Mechanisms and Macromolecules and Agricultural Implications*. Springer International Publishing, Cham, pp. 273–298.
- Kang, Y., Choi, Y.J., Lee, Y.R., Seo, K.H., Suh, J., Lee, H., 2021. Cut Flower Characteristics and Growth Traits under Salt Stress in Lily Cultivars. *Plants* 10, 1435.
- Kim, H.T., Lim, K.B., Kim, J.S., 2019. New insights on *Lilium* phylogeny based on a comparative phylogenomic study using complete plastome sequences. *Plants* 8.
- Lahiani, M.H., Nima, Z.A., Villagarcia, H., Biris, A.S., Khodakovskaya, M. V., 2018. Assessment of Effects of the Long-Term Exposure of Agricultural Crops to Carbon Nanotubes. *J. Agric. Food Chem.* 66, 6654–6662.

- Li, Z., Zhu, L., Zhao, F., Li, J., Zhang, X., Kong, X., Wu, H., Zhang, Z., 2022. Plant Salinity Stress Response and Nano-Enabled Plant Salt Tolerance. *Front. Plant Sci.* 13, 714.
- Liang, Z.X., Zhang, J.Z., Xin, C., Li, D., Sun, M.Y., Shi, L., 2022. Analysis of edible characteristics, antioxidant capacities, and phenolic pigment monomers in *Lilium* bulbs native to China. *Food Res. Int.* 151, 110854.
- Liu, Y., Cao, X., Yue, L., Wang, C., Tao, M., Wang, Z., Xing, B., 2022. Foliar-applied cerium oxide nanomaterials improve maize yield under salinity stress: Reactive oxygen species homeostasis and rhizobacteria regulation. *Environ. Pollut.* 299, 118900.
- Mahmoud, A.W.M., Rashad, H.M., Esmail, S.E.A., Alsamadany, H., Abdeldaym, E.A., 2023. Application of Silicon, Zinc, and Zeolite Nanoparticles—A Tool to Enhance Drought Stress Tolerance in Coriander Plants for Better Growth Performance and Productivity. *Plants* 12, 2838.
- Mangal, V., Lal, M.K., Tiwari, R.K., Altaf, M.A., Sood, S., Kumar, D., Bharadwaj, V., Singh, B., Singh, R.K., Aftab, T., 2023. Molecular Insights into the Role of Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulphur Species in Conferring Salinity Stress Tolerance in Plants. *J. Plant Growth Regul.* 42, 554–574.
- Mogazy, A.M., Hanafy, R.S., 2022. Foliar Spray of Biosynthesized Zinc Oxide Nanoparticles Alleviate Salinity Stress Effect on *Vicia faba* Plants. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 22, 2647–2662.
- Nagata, M., Yamashita, I., 1992. Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit. *Nippon SHOKUHIN KOGYO GAKKAISHI* 39, 925–928.
- Nasrallah, A.K., Kheder, A.A., Kord, M.A., Fouad, A.S., El-Mogy, M.M., Atia, M.A.M., 2022. Mitigation of Salinity Stress Effects on Broad Bean Productivity Using Calcium Phosphate Nanoparticles Application. *Horticulturae* 8.
- Pałka, P., Muszyńska, B., Szewczyk, A., Pawłowska, B., 2023. Elicitation and

- Enhancement of Phenolics Synthesis with Zinc Oxide Nanoparticles and LED Light in *Lilium candidum* L. Cultures In Vitro. *Agronomy* 13, 1–16.
- Rady, M.M., Mossa, A.T.H., Youssof, A.M.A., Sh. Osman, A., Ahmed, S.M.A., Mohamed, I.A.A., 2023. Exploring the reinforcing effect of nano-potassium on the antioxidant defense system reflecting the increased yield and quality of salt-stressed squash plants. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 308, 111609.
- Rasool, A., Hafiz Shah, W., Padder, S.A., Tahir, I., Alharby, H.F., Hakeem, K.R., ul Rehman, R., 2022. Exogenous selenium treatment alleviates salinity stress in Proso Millet (*Panicum miliaceum* L.) by enhancing the antioxidant defence system and regulation of ionic channels. *Plant Growth Regul.* 100, 479–494.
- Salachna, P., Byczyńska, A., Zawadzińska, A., Piechocki, R., Mizielińska, M., 2019. Stimulatory effect of silver nanoparticles on the growth and flowering of potted oriental lilies. *Agronomy* 9, 1–14.
- Sanchez-Navarro, J.F., Gonzalez-García, Y., Benavides-mendoza, A., Morales-Días, A.B., Gonzalez-Morales, S., Cadenas-pliego, G., Garcia-Guillermo, M. del S., Juárez-Maldonado, A., 2021. Silicon Nanoparticles Improve the Shelf Life and Antioxidant Status of *Lilium*. *Plants* 10, 2338.
- Sardar, H., Khalid, Z., Ahsan, M., Naz, S., Nawaz, A., Ahmad, R., Razzaq, K., Wabaidur, S.M., Jacquard, C., Širić, I., Kumar, P., Abou Fayssal, S., 2023. Enhancement of Salinity Stress Tolerance in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) via Foliar Application of Nitric Oxide. *Plants* 12, 1–24.
- Sarkar, M.M., Mukherjee, S., Mathur, P., Roy, S., 2022. Exogenous nano-silicon application improves ion homeostasis, osmolyte accumulation and palliates oxidative stress in *Lens culinaris* under NaCl stress. *Plant Physiol. Biochem.* 192, 143–161.
- Sayed, E.G., Mahmoud, A.W.M., El-Mogy, M.M., Ali, M.A.A., Fahmy, M.A.M., Tawfic, G.A., 2022. The Effective Role of Nano-Silicon Application in Improving the Productivity and Quality of Grafted Tomato Grown under Salinity Stress. *Horticulturae* 8.

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2023. ¡ Lilis o *Lilium* , un tesoro en la floricultura mexicana ! El proceso de recolección de *Lilium* es esencial para [WWW Document]. URL <https://www.gob.mx/siap>
- Seydmohammadi, Z., Rooin, Z., Rezvanipour, S., 2020. Accelerating the growth and flowering of *Eustoma grandiflorum* by foliar application of nano-ZnO and nano-CaCO₃. *Plant Physiol. Reports* 25, 140–148.
- Shams, M., Khadivi, A., 2023. Mechanisms of salinity tolerance and their possible application in the breeding of vegetables. *BMC Plant Biol.* 23, 1–11.
- Singh, A., 2022. Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use Manag.* 38, 39–67.
- Steiner, A.A., 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15, 134–154.
- Takahashi, J.A., Rezende, F.A.G.G., Moura, M.A.F., Domingute, L.C.B., Sande, D., 2020. Edible flowers: Bioactive profile and its potential to be used in food development. *Food Res. Int.* 129, 108868.
- Tang, Y., Liu, Y., Luo, K., Xu, L., Yang, P., Ming, J., 2022. Potential Applications of *Lilium* Plants in Cosmetics: A Comprehensive Review Based on Research Papers and Patents. *Antioxidants* 11.
- Tripathi, D., Singh, M., Pandey-Rai, S., 2022. Crosstalk of nanoparticles and phytohormones regulate plant growth and metabolism under abiotic and biotic stress. *Plant Stress* 6, 100107.
- Velikova, V., Yordanov, I., Edreva, A., 2000. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. *Plant Sci.* 151, 59–66.
- Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., Kopittke, P.M., 2016. Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences. *Trends Plant Sci.* 21, 699–712.
- Yasemin, S., Koksall, N., 2023. Comparative Analysis of Morphological, Physiological, Anatomic and Biochemical Responses in Relatively Sensitive *Zinnia elegans*

- ‘Zinnita Scarlet’ and Relatively Tolerant *Zinnia marylandica* ‘Double Zahara Fire Improved’ under Saline Conditions. *Horticulturae* 9, 247.
- Yu, Z., Dahlgren, R.A., 2000. Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage. *J. Chem. Ecol.* 26, 2119–2140.
- Zhao, Z., Li, T., Cheng, Y., Wang, F., Zhao, X., 2021. Morphological and metabolic responses of four *Iris germanica* cultivars under salinity stress. *Sci. Hortic.* (Amsterdam). 281, 109960.
- Zhu, M., Yu, J., Wang, R., Zeng, Y., Kang, L., Chen, Z., 2023. Nano-calcium alleviates the cracking of nectarine fruit and improves fruit quality. *Plant Physiol. Biochem.* 196, 370–380.
- Abeed, A. H. A., AL-Huqail, A. A., Albalawi, S., Alghamdi, S. A., Ali, B., Alghanem, S. M. S., Al-Haithloul, H. A. S., Amro, A., Tammam, S. A., & El-Mahdy, M. T. (2023). Calcium nanoparticles mitigate severe salt stress in *Solanum lycopersicon* by instigating the antioxidant defense system and renovating the protein profile. *South African Journal of Botany*, 161, 36–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.08.005>
- Alikhani, T. T., Tabatabaei, S. J., Torkashvand, A. M., & Talei, D. (2021). Silica nanoparticles and calcium on the histological characteristics and stem bending in gerbera cut flower. *Ornamental Horticulture*, 27(3), 334–343. <https://doi.org/10.1590/2447-536X.v27i3.2308>
- Ayyaz, A., Fang, R., Ma, J., Hannan, F., Huang, Q., Athar, H. ur R., Sun, Y., Javed, M., Ali, S., Zhou, W., & Farooq, M. A. (2022). Calcium nanoparticles (Ca-NPs) improve drought stress tolerance in *Brassica napus* by modulating the photosystem II, nutrient acquisition and antioxidant performance. *NanoImpact*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100423>
- Byczyńska, A., Zawadzińska, A., & Salachna, P. (2023). Colloidal Silver Nanoparticles Enhance Bulb Yield and Alleviate the Adverse Effect of Saline Stress on Lily Plants.

- Journal of Ecological Engineering*, 24(6), 338–347.
<https://doi.org/10.12911/22998993/163173>
- Chaud, M., Souto, E. B., Zielinska, A., Severino, P., Batain, F., Oliveira-Junior, J., & Alves, T. (2021). Nanopesticides in Agriculture: Benefits and Challenge in Agricultural Productivity, Toxicological Risks to Human Health and Environment. *Toxics*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/toxics9060131>
- Chhipa, H. (2017). Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 15–22. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>
- Cicek, S., & Nadaroglu, H. (2015). The use of nanotechnology in the agriculture. *Advances in Nano Research*, 3(4), 207–223. <https://doi.org/10.12989/anr.2015.3.4.207>
- Cokul Raj, M., Manokari, M., Arumugam, N., Dey, A., Faisal, M., Alatar, A. A., Alok, A., & Shekhawat, M. S. (2023). Silicon Nanoparticles Mediated In vitro Flowering and Study of Pollen Viability in *Vitex negundo* L. *Silicon*, 15(11). <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02397-4>
- Cordon, G., Lopez Valiño, I., Prieto, A., Costa, C., Marchi, M. C., & Diz, V. (2022). Effects of the nanoherbicide made up of atrazine-chitosan on the primary events of photosynthesis. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 12, 100144. <https://doi.org/10.1016/J.JPAP.2022.100144>
- Davari, M. R., Bayat Kazazi, S., & Akbarzadeh Pivezhzani, O. (2017). Nanomaterials: Implications on agroecosystem. In *Nanotechnology: An Agricultural Paradigm* (pp. 59–71). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4573-8_4
- Du, Y. peng, He, H. bin, Wang, Z. xuan, Wei, C., Li, S., & Jia, G. xia. (2014). Investigation and evaluation of the genus *Lilium* resources native to China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 61(2). <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0045-6>
- Farhangi-Abriz, S., & Torabian, S. (2018). Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. *Protoplasma*, 255(3), 953–962. <https://doi.org/10.1007/s00709-017-1202-0>

- Gandhi, N., Shruthi, Y., Sirisha, G., & Anusha, C. (2021). Facile and eco-friendly method for synthesis of calcium oxide (CaO) nanoparticles and its potential application in agriculture. *Haya Saudi J Life Sci*, 6(5), 89–103. <https://doi.org/10.36348/sjls.2021.v06i05.003>
- Gohari, G., Mohammadi, A., Akbari, A., Panahirad, S., Dadpour, M. R., Fotopoulos, V., & Kimura, S. (2020). Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 10(1), 912. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57794-1>
- González-García, Y., Flores-Robles, V., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., De La Fuente, M. C., Sandoval-Rangel, A., & Juárez-Maldonado, A. (2022). Application of two forms of silicon and their impact on the postharvest and the content of bioactive compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruits. *Biocell*, 46(11). <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.021861>
- Hadi, M. R., & Karimi, N. (2012). THE ROLE OF CALCIUM IN PLANTS' SALT TOLERANCE. *Journal of Plant Nutrition*, 35(13), 2037–2054. <https://doi.org/10.1080/01904167.2012.717158>
- Isayenkov, S. V. (2012). Physiological and molecular aspects of salt stress in plants. *Cytology and Genetics*, 46(5), 302–318. <https://doi.org/10.3103/S0095452712050040>
- Kaningini, A. G., Nelwamondo, A. M., Azizi, S., Maaza, M., & Mohale, K. C. (2022). Metal Nanoparticles in Agriculture: A Review of Possible Use. *Coatings 2022, Vol. 12, Page 1586*, 12(10), 1586. <https://doi.org/10.3390/COATINGS12101586>
- Karimian, N., Nazari, F., & Samadi, S. (2021). Morphological and Biochemical Properties, Leaf Nutrient Content, and Vase Life of Tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) Affected by Root or Foliar Applications of Silicon (Si) and Silicon Nanoparticles (SiNPs). *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(5), 2221–2235. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10272-4>

- Kasem, M. M., Abd El-Baset, M. M., Helaly, A. A., EL-Boraie, E. S. A., Alqahtani, M. D., Alhashimi, A., Abu-Elsaoud, A. M., Elkelish, A., Mancy, A. G., Alhumaid, A., & El-Banna, M. F. (2023). Pre and postharvest characteristics of *Dahlia pinnata* var. *pinnata*, cav. As affected by SiO₂ and CaCO₃ nanoparticles under two different planting dates. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17292>
- Khalid, M. F., Iqbal Khan, R., Jawaid, M. Z., Shafqat, W., Hussain, S., Ahmed, T., Rizwan, M., Ercisli, S., Pop, O. L., & Alina Marc, R. (2022). Nanoparticles: The Plant Saviour under Abiotic Stresses. In *Nanomaterials* (Vol. 12, Issue 21). <https://doi.org/10.3390/nano12213915>
- Lecourieux, D., Ranjeva, R., & Pugin, A. (2006). Calcium in plant defence-signalling pathways. *New Phytologist*, 171(2), 249–269. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01777.x>
- Mahmoud, L. M., Dutt, M., Shalan, A. M., El-Kady, M. E., El-Boray, M. S., Shabana, Y. M., & Grosser, J. W. (2020). Silicon nanoparticles mitigate oxidative stress of in vitro-derived banana (*Musa acuminata* ‘Grand Nain’) under simulated water deficit or salinity stress. *South African Journal of Botany*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.027>
- Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry. In *Molecules* (Vol. 28, Issue 2). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules28020661>
- Seifikalhor, M., Aliniaiefard, S., Shomali, A., Azad, N., Hassani, B., Lastochkina, O., & Li, T. (2019). Calcium signaling and salt tolerance are diversely entwined in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 14(11), 1665455. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1665455>
- Mohammad, Z. H., Ahmad, F., Ibrahim, S. A., & Zaidi, S. (2022). Application of nanotechnology in different aspects of the food industry. In *Discover Food* (Vol. 2, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00013-9>
- Mukarram, M., Khan, M. M. A., & Corpas, F. J. (2021). Silicon nanoparticles elicit an increase in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud.) Wats) agronomic

- parameters with a higher essential oil yield. *Journal of Hazardous Materials*, 412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125254>
- Mustapha, T., Misni, N., Ithnin, N. R., Daskum, A. M., & Unyah, N. Z. (2022). A Review on Plants and Microorganisms Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles, Role of Plants Metabolites and Applications. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 19, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/ijerph19020674>
- Nasrallah, A. K., Kheder, A. A., Kord, M. A., Fouad, A. S., El-Mogy, M. M., & Atia, M. A. M. (2022). Mitigation of Salinity Stress Effects on Broad Bean Productivity Using Calcium Phosphate Nanoparticles Application. *Horticulturae*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010075>
- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., & Issaabadi, Z. (2019). Applications of Nanotechnology in Daily Life. In *Interface Science and Technology* (Vol. 28). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00004-3>
- Nisha Raj, S., Anooj, E. S., Rajendran, K., & Vallinayagam, S. (2021). A comprehensive review on regulatory invention of nano pesticides in Agricultural nano formulation and food system. *Journal of Molecular Structure*, 1239, 130517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130517>
- Ondrasek, G., Rathod, S., Manohara, K. K., Gireesh, C., Anantha, M. S., Sakhare, A. S., Parmar, B., Yadav, B. K., Bandumula, N., Raihan, F., Zielińska-Chmielewska, A., Meriño-Gergichevich, C., Reyes-Díaz, M., Khan, A., Panfilova, O., Seguel Fuentealba, A., Romero, S. M., Nabil, B., Wan, C. (Craig), ... Horvatinec, J. (2022). Salt Stress in Plants and Mitigation Approaches. *Plants*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/plants11060717>
- Parihar, P., Singh, S., Singh, R., Singh, V. P., Prasad, S. M., Ramanuj, G., & Singhdev, P. (2014). *Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review Springer Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review Springer*. <https://doi.org/10.1007/s1135601437391/fulltext.html>

- Pavlovic, J., Kostic, L., Bosnic, P., Kirkby, E. A., & Nikolic, M. (2021). Interactions of Silicon With Essential and Beneficial Elements in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- Pelkonen, V.-P., & Pirttilä, A.-M. (n.d.). *Floriculture and Ornamental Biotechnology Taxonomy and Phylogeny of the Genus Lilium*.
- Pérez-Labrada, F., López-Vargas, E. R., Ortega-Ortiz, H., Cadenas-Pliego, G., Benavides-Mendoza, A., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Responses of Tomato Plants under Saline Stress to Foliar Application of Copper Nanoparticles. *Plants*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/plants8060151>
- Prabhakar, N., Thakur, H., Bharti, A., & Kaur, N. (2016). Chitosan-iron oxide nanocomposite based electrochemical aptasensor for determination of malathion. *Analytica Chimica Acta*, 939. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.08.015>
- Rasool, S., Hameed, A., Azooz, M. M., Muneeb-U-Rehman, Siddiqi, T. O., & Ahmad, P. (2013). Salt stress: Causes, types and responses of plants. In *Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress* (pp. 1–24). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_1
- Ren, Z.-M., Cui, L., Gao, C., Wu, Y., Cui, Q., Li, D.-Z., Zheng, L.-Q., & Xia, Y.-P. (2023). Effects of Morphological Characteristics, Nutritional Status and Light on the Scale Propagation of *Lilium*. *Agriculture*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture13071341>
- Ruan, Y. L. (2014). Sucrose metabolism: Gateway to diverse carbon use and sugar signaling. In *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 65, pp. 33–67). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040251>
- Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., & Sarwar, M. I. (2019). Abbas Shoukat, Maqsood Ul Hussan, Muhammad Ishtiaq Sarwar. A review: Impact of salinity on plant growth. *Nature and Science*, 1, 34–40. <https://doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>

- Sakhare, D. T. (n.d.). *Nanotechnology Applications in Science and Technology*. <http://ymerdigital.com>
- Salachna, P., Byczyńska, A., Zawadzińska, A., Piechocki, R., & Mizielińska, M. (2019). Stimulatory Effect of Silver Nanoparticles on the Growth and Flowering of Potted Oriental Lilies. *Agronomy*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy9100610>
- Sánchez-Navarro, J. F., González-García, Y., Benavides-Mendoza, A., Morales-Díaz, A. B., González-Morales, S., Cadenas-Pliego, G., García-Guillermo, M. del S., & Juárez-Maldonado, A. (2021). Silicon Nanoparticles Improve the Shelf Life and Antioxidant Status of *Lilium*. *Plants*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/plants10112338>
- Sharma, P., Pandey, V., Sharma, M. M. M., Patra, A., Singh, B., Mehta, S., & Husen, A. (2021). A Review on Biosensors and Nanosensors Application in Agroecosystems. In *Nanoscale Research Letters* (Vol. 16, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03593-0>
- Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N., & Ahmad, P. (2021). Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(3), 906–925. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7>
- Tang, Y. C., Liu, Y. J., He, G. R., Cao, Y. W., Bi, M. M., Song, M., Yang, P. P., Xu, L. F., & Ming, J. (2021). Comprehensive analysis of secondary metabolites in the extracts from different lily bulbs and their antioxidant ability. *Antioxidants*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/antiox10101634>
- Thor, K. (2019). Calcium—nutrient and messenger. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>
- Verma, K. K., Song, X. P., Joshi, A., Tian, D. D., Rajput, V. D., Singh, M., Arora, J., Minkina, T., & Li, Y. R. (2022). Recent Trends in Nano-Fertilizers for Sustainable Agriculture under Climate Change for Global Food Security. In *Nanomaterials* (Vol. 12, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/nano12010173>
- Wohlmuth, J., Tekielska, D., Čechová, J., & Baránek, M. (2022). Interaction of the Nanoparticles and Plants in Selective Growth Stages—Usual Effects and Resulting

- Impact on Usage Perspectives. In *Plants* (Vol. 11, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/plants11182405>
- Wu, H., & Li, Z. (2022). Nano-enabled agriculture: How do nanoparticles cross barriers in plants? In *Plant Communications* (Vol. 3, Issue 6). <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100346>
- Xie, Y., Yu, Y., Lu, L., Ma, X., Gong, L., Huang, X., Liu, G., & Yu, Y. (2018). CuO nanoparticles decorated 3D graphene nanocomposite as non-enzymatic electrochemical sensing platform for malathion detection. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 812. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.01.043>
- Youssef, N. M., Shaaban, S. A., Ghareeb, Z. F., & Taha, L. S. (2019). In vitro bulb formation of direct and indirect regeneration of *Lilium orientalis* cv. “Starfighter” plants. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 211. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0246-z>
- Zargar, M., Bayat, M., Saquee, F. S., Diakite, S., Ramzanovich, N. M., & Akhmadovich, K. A. S. (2023). New Advances in Nano-Enabled Weed Management Using Poly(Epsilon-Caprolactone)-Based Nanoherbicides: A Review. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agriculture13102031>
- Zargar, S. M., Mahajan, R., Bhat, J. A., Nazir, M., & Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. In *3 Biotech* (Vol. 9, Issue 3). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1613-z>
- Zhou, J., An, R., & Huang, X. (2021). Genus *Lilium*: A review on traditional uses, phytochemistry and pharmacology. In *Journal of Ethnopharmacology* (Vol. 270). <https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.113852>